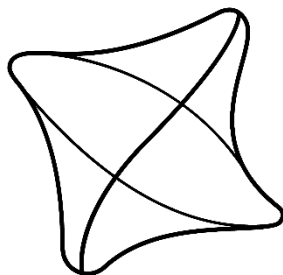


PRÁCE A ŠTÚDIE **STUDIES**

KATEDRA LETECKEJ DOPRAVY
AIR TRANSPORT DEPARTMENT

FAKULTA PREVÁDZKY A EKONOMIKY DOPRAVY A SPOJOV
FACULTY OF OPERATION AND ECONOMICS OF TRANSPORT AND COMMUNICATIONS



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
UNIVERSITY OF ŽILINA

VYDANIE 17
VOLUME 17

Žilina, 2025

REDAKČNÁ RADA

prof. Ing. **Antonín Kazda**, CSc.

Ing. **Michal Červínka**, PhD.

doc. Ing. **Branislav Kandra**, PhD.

doc. Ing. **Benedikt Badánik**, PhD.

doc. Ing. **Jozef Čerňan**, PhD.

Mgr. **Miriám Jarošová**, PhD.

Ing. **Ján Rostáš**, PhD.

doc. Ing. **Martin Bugaj**, PhD.

JUDr. doc. Ing. **Alena Novák Sedláčková**, PhD.

prof. Ing. **Anna Tomová**, CSc.

doc. Ing. **Filip Škultéty**, PhD.

Ing. **František Jůn**, CSc.

Ing. **Peter Blaško**, CSc.

doc. Ing. **Matúš Materna**, PhD.

prof. Ing. **Pavol Kurdel**, PhD.

dr inž. **Tomasz Łusiak**

assoc. prof. Dr. **Anna Stelmach**

assoc. prof. Dr. **Anna Rudavska**

doc. Ing. **Jakub Kraus**, Ph.D.

doc. Ing. **Peter Vittek**, Ph.D.

doc. Ing. **Vladimír Socha**, PhD.

Ing. **Stanislav Pleninger**, Ph.D.

Ing. **Ján Zýka**, Ph.D.

prof. RNDr. **Vladimír Krajčík**, Ph.D.

prof. Ing. **Ján Piľa**, PhD.

prof. **Doris Novak**, PhD.

doc. Ing. **Pavol Pecho**, PhD.

Ing. **Kristína Kováčiková**, PhD.

TECHNICKÝ REDAKTOR / TEXT DESIGNER

doc. Ing. **Matúš Materna**, PhD.

KONTAKT / CONTACT

Žilinská univerzita v Žiline / University of Žilina

Univerzitná 8215, 010 26 Žilina, Slovensko / Univerzitna 8215, 010 26 Žilina, Slovakia

kld@fpedas.uniza.sk

www.kld.uniza.sk

Všetky publikované články boli recenzované dvomi nezávislými recenzentmi a prešli schvaľovacím procesom redakčnej rady / All of these papers have been reviewed by two independent reviewers and have been processed by editorial board.

COPYRIGHT © Žilinská Univerzita v Žiline, Slovenská republika, 2025

COPYRIGHT © University of Žilina, Slovak Republic, 2025

Rozširované elektronicky / Published electronically

ISBN 978-80-554-2243-5

PREDHOVOR

Táto publikácia je výstupom vedeckej činnosti mladých vedeckých pracovníkov Katedry leteckej dopravy, Fakulty prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov Žilinskej univerzity v Žiline (ďalej len "KLD") vykonávanej pod dohľadom odborníkov, výskumníkov a vedeckých pracovníkov z praxe a univerzitného prostredia, ktorých úlohou bolo, aby svoje znalosti získané prevažne v rámci základného alebo aplikovaného výskumu priamo na KLD alebo v spolupráci s ňou odovzdávali "mladšej generácii". V súčasnosti prevažná časť výskumu KLD je riešená v spolupráci s Leteckým výcvikovým a vzdelávacím centrom Žilinskej univerzity v Žiline (ďalej len "LVVC") a zaoberá sa oblasťou výskumu a vývoja leteckej dopravy v previazanosti na ďalšie oblasti výskumu, možnosti využitia a aplikovania jedinečných technológií a vedeckých výstupov do praxe.

Cieľom publikácie je priblížiť vedecko výskumnú činnosť, ktorej sa venujú študenti, doktorandi, mladí vedeckí pracovníci a spolupracujúce organizácie predovšetkým v oblasti výskumu dopravy a dopravných služieb. Úlohou jednotlivých vedeckých statí a článkov bolo preukázať schopnosť analyzovať náročné teoretické úlohy, navrhovať ich technické riešenia ako aj zohľadňovať všetky ekonomické aspekty riešeného problému. Zároveň sa zameriavajú na riadenie dopravných podnikov, jednotlivé dopravné procesy a návrhy nových alebo inovovaných dopravných technológií, ktoré budú spĺňať požiadavky dnešnej praxe s dôrazom na kvalitu, bezpečnosť, minimalizáciu prevádzkových nákladov s ohľadom na potrebu trvalo udržateľného rozvoja spoločnosti a ochrany životného prostredia.

prof. Ing. **Andrej Novák**, PhD.
vedúci Katedry leteckej dopravy

OBSAH

RIADENIE RIZÍK SPOJENÝCH S ÚNAVOU ČLENA POSÁDKY	6
VPLYV DIGITALIZÁCIE NA ZAMESTNANOSŤ V OBLASTI LETECKEJ DOPRAVY	11
POKROČILÁ AERODYNAMIKA VÝŠKOVÝCH BEZPILOTNÝCH LIETAJÚCICH SYSTÉMOV (UAV)	18
PRÁVA CESTUJÚCICH SO ŠPECIFICKÝMI POTREBAMI	26
IDENTIFIKACE FAKTORŮ KONKURENCESCHOPNOSTI LETIŠTĚ BRNO - TUŘANY	32
ANALÝZA AERODYNAMICKÝCH RIEŠENÍ KONŠTRUKCIE UAV	36
IDENTIFIKÁCIA POVETERNOSTNÝCH PODMIENOK NA ZÁKLADE VÝSKYTU OBLAKOV	38
DOPAD VOJENSKÝCH KONFLIKTOV A POLITICKÝCH NEPOKOJOV NA LETECKÚ DOPRAVU	42
ANALÝZA SYSTÉMU SPOPLATNENIA LETECKÝCH NAVIGAČNÝCH SLUŽIEB	49
VYUŽITIE MOBILNÝCH SIETÍ PRE OVLÁDANIE A PRENOS VIDEA Z UAV	53
HISTÓRIA LETECKEJ METEOROLÓGIE	56
VÝŠKA ZÁKLADNE OBLAČNOSTI NA LETISKU ŽILINA PRI ROZLIČNÝCH POVETERNOSTNÝCH SITUÁCIÁCH	60
VERTIKÁLNE DOHODY EÚ O LETECKEJ DOPRAVE A ICH PRÍNOS	66
NOVÉ TECHNOLOGIE VO VŠEOBECNOM LETECTVE	71
ANALÝZA VYUŽÍVANIA UAVS AKO DOČASNÝCH ZARIADENÍ	77
VYUŽITIE NOVÝCH MATERIÁLOV V KROŠTRUKCII KRÍDEL LIETADIEL	85
LETISKO PIEŠTANY A ROZVOJ LETECKEJ DOPRAVY S OHĽADOM NA CHARAKTER REGIÓNU	91
PREVÁDZKOVO-TECHNICKÉ VÝCHODISKÁ KONCEPCIE BWB LETÚNOV	98
ANALÝZA VPLYVU TVARU ZAKONČENIA KRÍDLA NA JEHO AERODYNAMICKÉ VLASTNOSTI	102
KOMPARACE LETECKÉ LEGISLATIVY V OBLASTI LICENCOVÁNÍ LETECKÉHO PERSONÁLU V EU, USA A KANADĚ	114
POROVNANIE EFEKTÍVNOSTY ZÁKLADNÝCH KONCEPCIÍ UAV VZHĽADOM NA PREVÁDZKOVÉ PODMIENKY	120
ANALÝZA GHOST FLIGHTS A MOŽNOSTI RIEŠENIA GRANDFATHER SLOTOV V BUDÚCNOSTI	127
URBAN AIR MOBILITY AKO ĎALŠIA DIMENZIA DOPRAVY V MESTÁCH	136
VYUŽITIE POMOCNÝCH STABILIZAČNÝCH PLÔCH V CIVILNOM LETECTVE	141
ANALÝZA SÚČASNÝCH A MOŽNOSTI APLIKÁCIE NOVÝCH POSTUPOV PREDIKTÍVNEJ ÚDRŽBY	146
LETISKO M.R.ŠTEFÁNKA V BRATISLAVE A ROZVOJ DIAĽKOVÝCH LETOV	155
MODERNIZÁCIA PODVOZKU LIETADLA STRATON D7	159
ANALÝZA VYUŽITIA LIETADIEL ĽAHŠÍCH AKO VZDUCH NA OBCHODNÚ LETECKÚ PREVÁDZKOVÚ ČINNOSŤ A ANALÝZA PRECHODU LIETADIEL ĽAHŠÍCH AKO VZDUCH Z PILOTOVANÝCH NA BEZPILOTNÉ	161
POLYMORFNÉ KONŠTRUKCIE AKO SÚČASŤ RIADENIA LETÚNOV	169
ANALÝZA VPLYVU SPÄTNÉHO TLAKU VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU NA SPOTREBU PALIVA V DVOJDOBÝCH MOTOROCH	179
UMELÁ INTELIGENCIA AKO ĽUDSKÝ FAKTOR V LETECTVE	185
VYTVÁRANIE CVIČENÍ V PROSTREDÍ ESCAPE LIGHT SIMULÁTORA ATC	192
ANALÝZA VYBRANÝCH METÓD ZISŤOVANIA PRÍČIN NEHÔD V LETECKEJ DOPRAVE	197
DETEKCIA RUŠENIA GNSS SIGNÁLU PROSTREDNÍCTVOM ADS-B PRIJÍMAČOV	205

MODELOVANIE VZDUŠNÝCH PREISTOROV V PROSTREDÍ ESCAPE LIGHT SIMULÁTORA ATC PRE POTREBY VÝUČBY NA KATEDRE LETECKEJ DOPRAVY	210
REALIZÁCIA A NASTAVENIE MECHANIZMU RIADENIA PRE LIETADLO STRATON D7	216
VYUŽITIE UAV PRE MONITOROVANIE A ÚDRŽBU LETISKOVEJ INFRAŠTRUKTÚRY	221
SYSTÉM PRE MERANIE VYBRANÝCH VELIČÍN VO VETERNOM TUNELI	228
KONŠTRUKCIA BEZPILOTNÉHO LETÚNA S MOŽNOSŤOU VTOL	236
OPTIMALIZÁCIA LETOVÝCH TRATÍ S CIEĽOM ZNIŽOVANIA SPOTREBY PALIVA A EMISÍ	241
PRÍNOS NOVÝCH MEDZINÁRODNÝCH DOHÔD O LETECKEJ DOPRAVE	247
MODERN TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE USAGE IN THE AIRLINE'S OPERATIONAL CONTROL CENTRE	255
PROJEVY KLIMATICKÉ ZMĚNY NA VYBRANÝCH LETIŠTÍCH SLOVENSKA	261
MĚŘENÍ PARAMETRŮ VĚTRU NA PALUBĚ ULTRALEHKÉHO LETADLA	269
NÁVRH NA ZLEPŠENÍ PLÁNU STRATEGICKÉHO ROZVOJE LETIŠTĚ OSTRAVA	276
PREPRAVA NÁKLADU (CARGO) V BATOŽINOVÝCH PRIESTOROCH OSOBNÝCH LIETADIEL	279
NÁVRH A REALIZÁCIA ELEKTRONICKÉHO RIADENIA MOTORA P66/5B	285
NÁVRH A REALIZÁCIA EXPERIMENTÁLNEHO HYBRIDNÉHO RAKETOVÉHO MOTORA	291
OPTIMALIZÁCIA TECHNICKÝCH A LOGISTICKÝCH PROCESOV NA ZVÝŠENIE VYŤAŽENOSTI LIETADIEL V KOMBINOVANEJ LETECKEJ PREPRAVE	298
SPOLEČENSKÁ ZODPOVĚDNOST EVROPSKÝCH LETECKÝCH SPOLEČNOSTÍ V POST-COVIDOVÉM OBDOBÍ	306
ÚPRAVA TEPELÉHO MANAŽMENTU MOTORA ROTAX 912 PRE LIETADLO WT-9 DYNAMIC V ÚLOHE VLEČNÉHO LIETADLA	311
INOVÁCIA SÚSTAV TUBÍNOVÉHO MOTORA SAFÍR 5 – PALIVOVÁ A MAZACIA SÚSTAVA	317
OVERENIE METODIKY MERANIA POKLESU VÝKONNOSTI PRI ÚNAVE	323
VYUŽITIE SATELITNEJ NAVIGÁCIE BEZPILOTNÝMI PROSTRIEDKAMI	328
PERSPEKTÍVY ROZVOJA OBCHODNÉHO LETECTVA VO VYBRANÝCH KRAJINÁCH SVETA	338
SYSTÉM KONTROLY VSTUPU OSOB A VJEZDU VOZIDEL NA LETIŠTI LEOŠE JANÁČKA V OSTRAVĚ A POSOUZENÍ MOŽNOSTI JEHO ZLEPŠENÍ	344
IDENTIFIKÁCIA PREKÁŽOK V OKOLÍ LETISKA LZZI PROSTREDNÍCTVOM LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVANIA	348
ALTERNATÍVNE PROTIZRÁŽKOVÉ SYSTÉMY V CIVILNOM LETECTVE	355
KOMPLEXNÉ MODELOVANIE PRÚDENIA OKOLO VIACZLOŽKOVÝCH KONFIGURÁCIÍ	359
INTEGRÁCIA BEZPILOTNÝCH LETECKÝCH SYSTÉMOV	366
RIEŠENIE VÝPADKU SYSTÉMU A NEDOSTATKU PERSONÁLU PRI ODBAVOVANÍ CESTUJÚCICH NA LETISKÁCH	372
DOPADY EMISNÝCH SYSTÉMOV NA LETECKÉ SPOLOČNOSTI	376
OPTIMALIZÁCIA RIADENIA UAV: ANALÝZA ĽUDSKÉHO FAKTORA A JEHO VPLYV NA BEZPEČNOSŤ A EFEKTIVITU PREVÁDZKY	383



RIADENIE RIZÍK SPOJENÝCH S ÚNAVOU ČLENA POSÁDKY

Miroslav Barlík

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Branislav Kandra

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This paper investigates crew fatigue risk management in aviation, analyzing legislative frameworks from ICAO, EASA, and Slovak authorities. It explores Fatigue Risk Management Systems (FRMS) as a data-driven alternative to prescriptive flight time limitations. A case study on Žilina Airport evaluates bio-mathematical models, identifying FAID Standard as the optimal solution due to its simplicity, affordability, and suitability for small-scale operations. The study proposes a cost-effective FRMS implementation, offering practical recommendations to enhance aviation safety at regional airports.

Keywords

atigue, risk management, FRMS, aviation safety, bio-mathematical models, FAID Standard, Žilina Airport, legislative framework, circadian rhythms

1. Úvod

Únava členov posádky predstavuje vážnu hrozbu pre bezpečnosť leteckej prevádzky, pretože negatívne ovplyvňuje kognitívne schopnosti, rozhodovanie a celkový výkon. Tento problém viedol k vytvoreniu komplexných legislatívnych rámcov na medzinárodnej, európskej a národnej úrovni, ktoré sa zameriavajú na zmiernenie rizík spojených s únavou. Medzinárodná organizácia civilného letectva (ICAO), Agentúra Európskej únie pre bezpečnosť letectva (EASA) a slovenské letecké orgány stanovili predpisy, ktoré kombinujú tradičné limity letového času (FTL) s modernými systémami riadenia rizík únavy (FRMS). [1,2,3,4,6]

FRMS predstavuje vedecky podložený, dátovo orientovaný prístup, ktorý umožňuje flexibilné prispôsobenie riadenia únavy špecifickým prevádzkovým podmienkam. Tento článok analyzuje tieto legislatívne rámce a navrhuje praktickú implementáciu FRMS na letisku Žilina, regionálnom centre pre výcvik pilotov, biznis lety a špeciálne operácie, ako napríklad letecká záchranka. Štúdia je rozdelená do troch hlavných častí: analýza legislatívnych dokumentov, preskúmanie princípov a implementácie FRMS a prípadová štúdia zameraná na aplikáciu FRMS na letisku Žilina. Cieľom je poskytnúť komplexný pohľad na riadenie únavy v letectve a navrhnuť stratégie na zlepšenie bezpečnosti prostredníctvom efektívneho manažmentu rizík únavy. [5]

Letisko Žilina, ako malé regionálne letisko, má špecifické potreby, ktoré vyžadujú jednoduché a cenovo dostupné riešenia. Výber vhodného bio-matematického modelu a návrh implementačného procesu sú kľúčové pre zabezpečenie bezpečnosti bez nadmerného finančného zaťaženia. Tento článok ponúka konkrétne odporúčania, ktoré môžu slúžiť ako vzor pre iné regionálne letiská s podobnými prevádzkovými charakteristikami. [5,4]

2. Metodika a metódy skúmania

Pri výskume sme využili tri hlavné metódy na dosiahnutie stanovených cieľov:

1. **Analýza dokumentov:** Podrobne boli preskúmané kľúčové legislatívne dokumenty, vrátane Annexu 6 a Dokumentu 9966 od ICAO, Nariadenia (EÚ) č. 965/2012 od EASA a slovenských zákonov, ako je Zákon č. 143/1998 Z. z. o civilnom letectve. Táto analýza poskytla hlboké pochopenie právneho a regulačného rámca riadenia únavy v letectve.
2. **Porovnávací analýza:** Štyri bio-matematické modely (SAFTE, FAID, BAM, FRI) boli hodnotené na základe kritérií jednoduchosti, nákladov, relevantnosti a presnosti. Tento prístup umožnil identifikovať najvhodnejší model pre letisko Žilina, zohľadňujúc jeho špecifiká ako malé regionálne letisko.
3. **Kvantitatívna analýza nákladov:** Na odhad nákladov implementácie modelu FAID Standard boli použité údaje od spoločnosti InterDynamics, vrátane cien hardvéru (počítače), softvérových licencií a prevádzkových nákladov (internet, školenia). Tieto výpočty potvrdili finančnú uskutočniteľnosť navrhovaného riešenia.

Tieto metódy umožnili komplexný prístup k problematike, kombinujúc teoretické poznatky s praktickou aplikáciou, aby bolo možné navrhnuť efektívne a udržateľné riešenie pre letisko Žilina.

3. Výsledky

3.1. Legislatívny rámec spojený s únavou člena posádky

3.1.1. Legislatívny rámec ICAO v súvislosti s únavou člena posádky

Medzinárodná organizácia civilného letectva (ICAO) stanovuje globálne štandardy a odporúčané postupy (SARPs) pre bezpečnú prevádzku civilného letectva. Kľúčové dokumenty, ako Annex 6 (Časť I), Dokument 9966, Circular 315 a Annex 19, definujú únavu ako fyziologický stav, ktorý znižuje schopnosť jednotlivca

vykonávať úlohy bezpečne a efektívne. Tento stav je spôsobený nedostatkom spánku, dlhodobou bdelosťou, narušením cirkadiánnych rytmov alebo nadmernou pracovnou záťažou.[1,2,7]

ICAO kladie dôraz na vedecký prístup k riadeniu únavy, ukladá členským štátom povinnosť zaviesť predpisy obmedzujúce letový čas a minimálne obdobia odpočinku. Dokument 9966 ponúka usmernenia pre implementáciu FRMS ako alternatívy k pevným limitom, zatiaľ čo Annex 19 integruje riadenie únavy do Systémov riadenia bezpečnosti (SMS). Tieto dokumenty zdôrazňujú potrebu systematickej identifikácie a zmiernenia rizík spojených s únavou, čím prispievajú k zvýšeniu bezpečnosti leteckej prevádzky.[1,2,7]

3.1.2. Legislatívny rámec EASA v súvislosti s únavou člena posádky

Agentúra EÚ pre bezpečnosť letectva (EASA) vyvinula komplexný legislatívny rámec založený na vedeckých princípoch a prevádzkových skúsenostiach. Nariadenie (EÚ) č. 965/2012 (ORO.FTL.120) stanovuje limity letového času (napr. maximálne 13 hodín denne, 110 hodín za 14 dní) a minimálne obdobia odpočinku, zohľadňujúc cirkadiánne rytmy a kumulatívnu únavu. EASA podporuje FRMS ako výkonnostne orientovaný systém, ktorý umožňuje operátorom prispôsobiť riadenie únavy ich špecifickým potrebám.[3]

Časť 145 Nariadenia (EÚ) č. 1321/2014 sa zameriava na personál údržby, stanovujúc limity pracovného času, najmä pri nočných zmenách, aby sa predišlo chybám spôsobeným únavou. EASA vyžaduje povinné školenia pre letové posádky, technický personál a manažérov, ktoré sa zameriavajú na rozpoznávanie symptómov únavy a stratégie jej zmiernenia. Tieto opatrenia zabezpečujú jednotný bezpečnostný štandard v rámci Európskej únie.[3,12]

3.1.3. Legislatívny rámec verejného letectva na Slovensku v súvislosti s únavou člena posádky

Slovenská legislatíva je harmonizovaná s požiadavkami ICAO a EASA, tvoriac komplexný súbor právnych noriem zameraných na bezpečnosť leteckej prevádzky. Kľúčové dokumenty zahŕňajú Zákon č. 143/1998 Z. z. o civilnom letectve, Nariadenie vlády č. 344/2005 Z. z. a letecké predpisy série L. Tieto predpisy definujú maximálne limity letového času (napr. 13 hodín denne) a minimálne obdobia odpočinku (napr. 12 hodín po službe), zohľadňujúc fyziologické potreby posádky.[6,13]

Dopravný úrad SR dohliada na dodržiavanie týchto predpisov a podporuje implementáciu FRMS ako alternatívy k pevným limitom. Národný program bezpečnosti civilného letectva (NPBCL) integruje únavu do SMS, vyžadujúc od operátorov systematické identifikovanie rizík, úpravu harmonogramov a poskytovanie školení. Slovenská legislatíva presadzuje „Just Culture“, ktorá umožňuje posádkam hlásiť únavu bez obáv z trestu, čím prispieva k včasnej identifikácii a riešeniu problémov.[6,13]

3.2. Systémy riadenia rizika únavy (FRMS) v letectve

FRMS je vedecky podložený systém využívajúci bio-matematické modely na predikciu únavy. Zahŕňa hodnotenie rizík, zmiernenie, monitorovanie a školenie posádok. Výhody

zahŕňajú zvýšenú bezpečnosť, flexibilitu plánovania a zlepšenie zdravia posádky. Výzvy zahŕňajú kultúrne bariéry, zdrojové obmedzenia a správu dát.[2,4,14]

3.3. Návrh procesu zmiernenia rizík spojených s únavou člena posádky

3.3.1. Analýza vhodnosti bio-matematických modelov pre letisko Žilina

Letisko Žilina je malé regionálne letisko obsluhujúce výcvikové lety Žilinskej univerzity, biznis lety a špeciálne operácie (napr. letecká záchranka). Pre jeho špecifiká bolo porovnaných štyri bio-matematické modely:[5]

- SAFTE: Presný, ale zložitý a drahý, nevhodný pre malé prevádzky.[8]
- FAID: Jednoduchý, cenovo dostupný, ideálny pre krátke lety; FAID Standard je optimálny.[4]
- BAM: Špecializovaný na dlhé lety, príliš nákladný.[9]
- FRI: Lacný, ale nedostatočne presný.[10]

FAID Standard bol vybraný pre jeho jednoduchosť, nízke náklady (€1,000–€2,000 ročne) a vhodnosť pre krátke, nepravidelné lety.

3.3.2. Implementácia FAID Standard na letisku Žilina

Navrhovaný proces implementácie FRMS na letisku Žilina s využitím modelu FAID Standard je navrhnutý tak, aby bol jednoduchý, finančne dostupný a efektívny, zohľadňujúc obmedzené zdroje malého letiska. Implementácia zahŕňa nasledujúce kroky:[4]

1. Získanie softvéru:

Kontaktovať spoločnosť InterDynamics (www.interdynamics.com) na získanie cenovej ponuky pre FAID Standard.

Požadovať o skúšobnú licenciu na otestovanie softvéru v reálnych podmienkach letiska.

Po úspešnom testovaní zakúpiť plnú licenciu (odhadované náklady: €1,000–€2,000 ročne, vrátane technickej podpory).[4]

2. Výber a školenie tímu:

Vytvoriť malý tím (2–3 osoby), napr. manažér letovej prevádzky, plánovač harmonogramov a zástupca bezpečnostného oddelenia, ktorý bude zodpovedný za správu a používanie FAID Standard.

Absolvovať online školenia poskytované InterDynamics, zamerané na ovládanie softvéru a interpretáciu jeho výstupov (odhadovaná dĺžka: niekoľko hodín až 1–2 dni).

Náklady na školenie sú minimálne, pretože online formát eliminuje cestovné výdavky.[4]

3. Zber a správa dát:

Zhromaždiť údaje o pracovných harmonogramoch pilotov, kabínového personálu a technikov, vrátane:

- Časov začiatku a konca služieb.
- Dĺžky a načasovania prestávok.
- Odhadovaných časov spánku (na základe štandardných modelov spánku).
- Údaje môžu byť získané z existujúcich plánovacích systémov letiska alebo manuálne zaznamenané počas prechodného obdobia.

Na správu údajov postačuje štandardný softvér, ako Microsoft Excel (zahrnutý v bežných licenciách Windows), prípadne špecializovaný plánovací softvér ako Shiftboard (€50–€100 mesačne pre 20–30 zamestnancov).[4]

4. Integrácia do plánovania letov:

Používať FAID Standard na analýzu harmonogramov a identifikáciu období s vysokým rizikom únavy, najmä pri výcvikových letoch, kde študenti lietajú viackrát denne.

Na základe výstupov FAID upraviť rozvrhy, napr.:

- Presunúť lety na menej rizikové časy (mimo nočných hodín alebo období cirkadiánneho poklesu).
- Predĺžiť prestávky medzi službami pre pilotov a technikov.
- Obmedziť po sebe idúce náročné služby, aby sa znížila kumulatívna únava.

Softvér poskytuje FAID skóre, ktoré indikuje úroveň únavy, čo uľahčuje rozhodovanie o úpravách plánov.[4]

5. Monitorovanie a spätná väzba:

Po zavedení systému sledovať jeho vplyv na bezpečnosť, napr. zníženie počtu incidentov spôsobených únavou alebo zlepšenie hlásení posádok.

Pravidelne zbierať spätnú väzbu od pilotov, kabínového personálu a technikov, aby sa systém mohol ďalej prispôbiť špecifickým potrebám letiska.

Vytvoriť anonymný systém hlásenia únavy, podporujúci „Just Culture“, aby posádky mohli bez obáv upozorniť na potenciálne riziká.

Na základe monitorovania a spätnej väzby priebežne optimalizovať harmonogramy a procesy.[4]

6. Technologické požiadavky:

Hardvér: 1–2 štandardné kancelárske počítače s operačným systémom Windows (minimálne Intel Core i3, 4 GB RAM, 500 GB úložisko). Odhadované náklady: €300–€1,000.

Internetové pripojenie: Štandardné širokopásmové pripojenie (10 Mbps) na aktualizácie softvéru a technickú podporu (€20–€50 mesačne).

Softvér: FAID Standard ako desktopová aplikácia, nevyžadujúca dodatočné technológie, ako nositeľné zariadenia.[4]

3.3.3. Odhadované celkové náklady:

Jednorazové: €300–€1,000 (počítače).

Pravidelné: €1,000–€2,000 ročne (licencia FAID Standard), €20–€50 mesačne (internet a plánovací softvér).[4]

3.4. Možnosti budúcej modernizácie

Pre dlhodobé zlepšenie presnosti predikcií únavy sa odporúča zvážiť prechod na pokročilejší model FAID Quantum, ktorý umožňuje integráciu údajov o skutočnom spánku z nositeľných zariadení (napr. Garmin Vivosmart, Fitbit Charge). Tento model poskytuje Karolinska Sleepiness Scale (KSS) skóre a detailnejšie analýzy spánkových vzorcov, čo je vhodné pre presnejšie riadenie únavy.[4]

3.4.1. Kroky pre implementáciu FAID Quantum:

1. **Nákup nositeľných zariadení:** Zakúpiť 20–30 zariadení pre pilotov a kľúčový personál (€100–€200 za zariadenie, celkovo €2,000–€4,000).
2. **Integrácia dát:** Vyvinúť softvér na prenos údajov z nositeľných zariadení do FAID Quantum, buď manuálne (bez dodatočných nákladov) alebo automatizovane cez API (€500–€1,000 jednorazovo).
3. **Školenie:** Rozšíriť školenia tímu o prácu s údajmi zo zariadení a interpretáciu KSS skóre.
4. **Licencia:** Zakúpiť FAID Quantum (Small Business edícia, €2,800 jednorazovo + €540 ročne za podporu).

3.4.2. Odhadované náklady pre FAID Quantum:

- **Jednorazové:** €3,100–€7,800 (licencia, hardvér, nositeľné zariadenia, integrácia).
- **Pravidelné:** €540 ročne (podpora), €20–€50 mesačne (internet).

FAID Quantum je odporúčaný ako budúca modernizácia, ak letisko získa dostatočné finančné zdroje a preukáže sa potreba presnejších údajov. Prechod by mal byť postupný, začínajúc s FAID Standard a po vyhodnotení jeho efektívnosti (po 1–2 rokoch) zvážiť upgrade.[15]

3.5. Význam návrhu pre letisko Žilina

Navrhované riešenie je šité na mieru pre letisko Žilina, zohľadňujúc jeho obmedzený rozpočet (odhadovaný počet zamestnancov: 10–30) a špecifické prevádzkové potreby. Implementácia FAID Standard umožní:

- **Zvýšenie bezpečnosti:** Minimalizácia rizík únavy u pilotov a technikov, čo je kľúčové pri výcvikových letoch s vysokou frekvenciou.

- **Optimalizácia harmonogramov: Efektívnejšie plánovanie služieb, zníženie kumulatívnej únavy a zlepšenie pracovných podmienok.**
- **Nákladová efektivita: Nízke počiatkové a prevádzkové náklady, ktoré sú v súlade s finančnými možnosťami malého letiska.**
- **Súlad s reguláciami: Splnenie požiadaviek ICAO, EASA a slovenskej legislatívy na riadenie únavy.**
- **Budúca škálovateľnosť: Možnosť prechodu na FAID Quantum bez potreby zásadných zmien v infraštruktúre.**

Tento návrh môže slúžiť ako model pre iné regionálne letiská s podobnými prevádzkovými charakteristikami, čím prispieva k širšiemu uplatneniu FRMS v malých leteckých prevádzkach.[4,5,6]

4. Záver

Táto štúdia potvrdila, že legislatívne rámce ICAO, EASA a Slovenskej republiky efektívne riešia problematiku únavy členov posádky, pričom FRMS poskytuje flexibilitu na prispôsobenie riadenia únavy špecifickým prevádzkovým potrebám. Analýza bio-matematických modelov ukázala, že FAID Standard je najvhodnejším riešením pre letisko Žilina, kombinujúc jednoduchosť, cenovú dostupnosť a spoľahlivosť pre malé prevádzky s krátkymi a nepravidelnými letmi.

Navrhovaný proces implementácie FAID Standard je finančne uskutočniteľný, vyžadujúc minimálne počiatkové investície a malý tím na správu systému. Dlhodobým cieľom je potenciálny prechod na FAID Quantum, ktorý by využitím nositeľných technológií mohol ďalej zvýšiť presnosť predikcií únavy. Výsledky štúdie ponúkajú praktické odporúčania pre letisko Žilina a môžu slúžiť ako vzor pre iné regionálne letiská s podobnými charakteristikami.

Práca prispieva k lepšiemu pochopeniu manažmentu únavy v letectve a zdôrazňuje dôležitosť proaktívnych opatrení na zvýšenie bezpečnosti. Budúci výskum by mal preskúmať pokročilé bio-matematické modely, nositeľné technológie a ich integráciu do FRMS, aby sa ďalej zlepšila predikcia únavy a celková bezpečnosť leteckej prevádzky.

Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

- [1] ICAO. Annex 6: Prevádzka lietadiel, Časť I. [Online] 2018. Dostupné: [https://www.icao.int/safety/CAPSCA/PublishingImages/Pages/ICAO-SARPs-\(Annexesand-PANS\)/Annex%206.pdf](https://www.icao.int/safety/CAPSCA/PublishingImages/Pages/ICAO-SARPs-(Annexesand-PANS)/Annex%206.pdf) [citované: 15. október 2024].

- [2] ICAO. Dokument 9966: Manuál pre dohľad nad prístupmi k riadeniu únavy. [Online] 2017. Dostupné: <https://www.icao.int/safety/fatiguemanagement/FRMS%20Tools/Doc%209966.FRMS.2016%20Edition.en.pdf> [citované: 15. október 2024].
- [3] EASA. Nariadenie (EÚ) č. 965/2012. [Online] 2012. Dostupné: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/?uri=CELEX:32012R0965> [citované: 27. október 2024].
- [4] InterDynamics. Softvér FAID Quantum. [Online] 2023. Dostupné: <https://www.interdynamics.com/fatigue-risk-management-solutions/fatigue-risk-management-products/faid-quantum-software/> [citované: 10. marec 2025].
- [5] Letisko Žilina. [Online] 2025. Dostupné: <https://www.letisko.sk/> [citované: 25. január 2025].
- [6] Slovenská republika. Zákon č. 143/1998 Z. z. o civilnom letectve. [Online] 1998. Dostupné: <https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/1998/143/> [citované: 2. november 2024].
- [7] ICAO. Annex 19: Riadenie bezpečnosti. [Online] 2013. Dostupné: <https://www.icao.int/safety/safetymanagement/documents/annex%2019%20icao%20presentation%20-%20self%20instruction%20september2013.pdf> [citované: 15. október 2024].
- [8] Balkin, T. The Fatigue Avoidance Scheduling Tool: Modeling to Minimize the Effects of Fatigue on Cognitive Performance. [Online] 2004. Dostupné: https://www.academia.edu/65816662/The_fatigue_avoidance_scheduling_tool_Modeling_to_minimize_the_effects_of_fatigue_on_cognitive_performance [citované: 8. december 2024].
- [9] Boeing. BAM Technical Fact Sheet. [Online] 2014. Dostupné: https://s3.amazonaws.com/emmasassets/hd6ab/a6a02c61e154ca96a81acbb4de2f5f4b/BAM_Tech_Fact_Sheet_2.3.pdf [citované: 28. január 2025].
- [10] FRMSc. Fatigue Risk Index (FRI). [Online] 2017. Dostupné: <https://www.frmsc.com/products/fri/> [citované: 28. január 2025].
- [11] HelloComp. Kancelárske počítače. [Online] 2025. Dostupné: <https://stolne-pocitace.heureka.sk/f:12852:107795;12853:107981;q:kancelarske%20pocitace/?o=4> [citované: 20. február 2025].
- [12] EASA. Nariadenie (EÚ) č. 1321/2014, Časť 145. [Online] 2016. Dostupné: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02014R1321-20240612> [citované: 28. október 2024].
- [13] Slovenská republika. Nariadenie vlády č. 344/2005 Z. z. o organizácii pracovného času v doprave. [Online] 2005. Dostupné: <https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/2007/462/> [citované: 1. november 2024].

- [14] Shaik, S. Effectiveness of Fatigue Risk Management System in Aviation. [Online] 2024. Dostupné: <https://urfjournals.org/open-access/effectiveness-of-fatigue-risk-management-system-in-aviation.pdf> [citované: 8. december 2024].
- [15] Fitbit. Chytré náramky. [Online] 2025. Dostupné: <https://chytrenaramky.heureka.sk/f:21567:626640/?o=4> [citované: 20. február 2025].



VPLYV DIGITALIZÁCIE NA ZAMESTNANOSŤ V OBLASTI LETECKEJ DOPRAVY

Richard Bebjak
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Kristína Kováčiková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Digitalization is becoming an increasingly common part of human lives and societies today. It is also slowly interfering in every process of companies to increase their efficiency and competitiveness. This thesis is specifically intended for air transport, in which it is focused on analyzing the effects of digitalization on employment. The first part of the thesis defines digitalization, digital technologies and characteristics of the labor market, along with employee satisfaction. The analysis of the current state is part of the second part of the thesis, which deals with current digital technologies and how they affect employees, and current employment trends, i.e. what measures companies are taking to improve employment in the workplace. The results of the thesis identify the impacts of digitalization on individual job positions, various positive and negative impacts on the labor market, and finally, recommendations are provided for better integration of digitalization. With these findings, the thesis achieved the desired goal of analyzing the impact of digitalization on employment in the field of air transport.

Keywords

Digitalization, Digital technologies, Aviation revolutions, Airport digitalization, Employee satisfaction

1. Úvod

S digitalizáciou sa ľudia stretávajú v dnešnej dobe pomaly na každom kroku. Ovplyvňuje ich v každodennom živote a pomaly si nevieme predstaviť bez nej existovať či už pomocou mobilných alebo inteligentných zariadení. Tento článok zaoberá vplyvom digitalizácie na zamestnanosť v oblasti leteckej dopravy, ktorá postupne premieňa manuálne práce a procesy na digitálne technológie.

V prvom rade sa zaoberá teoretickými poznatkami ako definovanie digitalizácie a vysvetľuje pojem digitálne technológie aj jednotlivé z nich, pomocou ktorých je možná realizácia digitalizácie. Následne poskytuje prehľad vývoja digitalizácie v odvetví leteckej dopravy a ku koncu kapitoly vysvetľuje pojem spokojnosť zamestnancov.

Následne sa článok zaoberá analýzou súčasného stavu digitalizácie v oblasti leteckej dopravy. Najprv sa venuje analýze súčasného stavu digitalizácie, konkrétne aké digitálne technológie v súčasnosti využívajú vybrané letecké spoločnosti a letiská a akým spôsobom vplývajú na zamestnanosť a zamestnancov. V druhej časti sa zaoberá súčasnými trendami zamestnanosti rovnakých leteckých spoločností a letísk.

Všetky doposiaľ nadobudnuté poznatky a informácie, sú v článku aplikované na poskytnutie výsledkov práce. Súčasťou nich je určený vplyv digitalizácie na jednotlivé pracovné pozície, ktoré sú obsiahnuté v analýze a taktiež identifikácia pozitívnych a negatívnych dopady na pracovný trh. Ďalej porovnáva zistenia s prípadovou štúdiou, ktorá sa zaoberala dopadom digitalizácie na spokojnosť zamestnancov v letectve. Výsledky poskytujú odporúčania pre lepšiu integráciu digitalizácie do pracovného prostredia leteckej dopravy.

2. Teoretické východiská riešenej problematiky

Digitalizácia je jednou z najdôležitejších revolúcií, ktoré majú veľký vplyv na spoločnosť a svet podnikania. Dnešné spoločnosti čelia veľkému tlaku na implementáciu digitálnych technológií a premietnutie nového normálu do svojich nových obchodných stratégií. Schopnosť implementovať digitálne technológie má veľa výhod, avšak nie je bez nákladov a výdavkov (Reis, et al., 2020). Podľa definícií Oxfordského slovníka angličtiny (OED) možno pojem digitalizácia vyhľadať až do 50. rokov 20. storočia v spojení s počítačmi ako „činnosť alebo proces digitalizácie, konverzia analógových údajov do digitálnej podoby“, avšak rovnaký pojem digitalizácia je definovaný ako „prijatie alebo zvýšenie používania digitálnej alebo počítačovej technológie organizáciou, priemyslom, krajinou, atď.“ (Schumacher, et al., 2016). Digitalizácia, pre potreby článku, je definovaná ako proces prevodu manuálnych prác alebo analógových údajov do digitálnej podoby a ich postupná implementácia do procesov spoločností.

2.1. Digitálne technológie

V dnešnej dobe sa dostávame do bodu, kde sa účinok digitálnych technológií prejavuje plnou silou a umožňuje bezprecedentné veci. Dochádza k zbiehaniu viacerých technológií, ako sú virtuálna realita (VR), biometria, umelá inteligencia (AI), neuroveda, blockchain, cloudové databázy, aplikácie a automatizácia obchodných procesov, ako aj interakcie medzi strojmi prostredníctvom internetu vecí (IoT) a veľkých dát (Mutlu, et al., 2022). Inovácie navzájom nadväzujú a zosilňujú vo viacerých spojeniach technológií vo fyzickej, digitálnej a sociálnej sfére. Okrem toho majú digitálne technológie prvky mobility a konektivity, ktoré poskytujú okamžitú interakciu a prístup k širokej škále údajov a výpočtového výkonu. Tieto vlastnosti sa odrážajú aj v dnešných produktoch a službách, a tým umožňujú širší dosah ľudí bez ohľadu na geografickú polohu (Molchanova, et al., 2020).

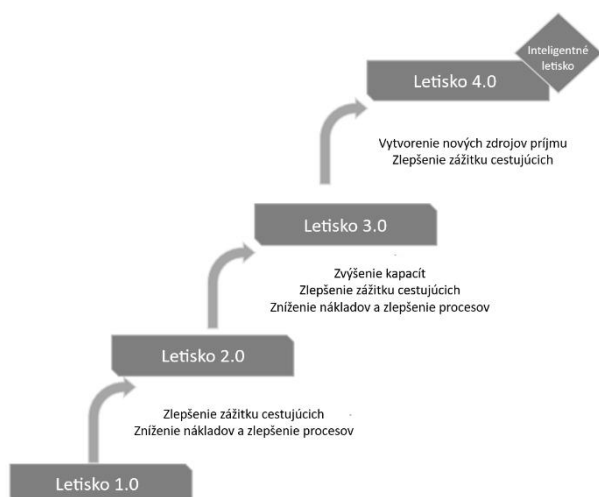
Digitálne technológie priniesli mnoho zmien v našich životoch a podnikaní. Dnes je letecká doprava veľmi rozvinutým a náročným odvetvím a bez vhodnej stratégie digitálnej transformácie je ťažké uspieť. Tieto technológie ponúkajú príležitosti, ktoré letecký sektor využíva a začleňuje do zlepšovania zážitku z lietania. Tzv. digitálni zákazníci sú kľúčovým trendom v odvetví letectva a vynakladá sa úsilie na ich začlenenie do online nakupovania, sociálnych médií a mechanizmov spätnej väzby (Molchanova, 2021).

2.2. Digitalizácia letísk

Proces letiskovej digitalizácie začal v 80-tych rokoch tým, keď si letecké spoločnosti a poskytovatelia pozemných služieb uvedomili, že je užitočné zdieľať IT infraštruktúru na letisku, aby sa vyhlili veľkým investíciám, najmä pri realizácii nových trás a charterových letoch (Yaqoobi, 2019). Keďže otváranie nových priestorov a nábor nových odbavovacích agentov na letisku bolo nákladné a ťažšie dostupné, zaviedol sa systém Common Use Terminal Equipment (CUTE). Je to pokročilý systém aplikovaný na letiskách na zvýšenie prevádzkovej efektívnosti a odbavovania cestujúcich s cieľom umožniť flexibilnejšieho a dynamickejšieho využívania terminálových priestorov a zariadení (A-ICE, 2024).

Druhá fáza prišla v roku 2003 spolu s implementáciou samoobslužného odbavenia na letiskách (Dias, 2024). Táto inovácia čiastočne nahradila tradičných odbavovacích agentov a výrazne urýchlila proces odbavenia cestujúcich. Avšak rozšírenie druhej fázy digitalizácie letísk malo dopad najmä v regiónoch s vysokými nákladmi na pracovnú silu, ako je Európa, USA a časti ázijsko-pacifickéj oblasti (Yaqoobi, 2019).

Tretia fáza digitalizácie začala v roku 2010 implementáciou samoobslužných kioskov na hraničnú kontrolu, pred nástup do lietadla a na odbavenie batožiny (Nau & Benoit, 2017). Toto umožnilo cestujúcim zvládnuť niektoré činnosti na letisku samostatne, čím sa zvýšila produktivita zamestnancov a riadenie času pre cestujúcich.



Obrázok 1: Kategórie letísk, Zdroj: autor na základe (Yaqoobi, 2019)

Posledná štvrtá fáza využíva veľké dáta a otvorené dáta na podporu inovácií a zvýšenie výkonnosti letiskových činností (Yaqoobi, 2019). Prevádzkovatelia týchto letísk môžu veľa získať zhromažďovaním a analýzou údajov o cestujúcich v reálnom

čase. Táto fáza sa označuje ako éra technológií a prostredníctvom procesu digitálnej transformácie letiská menia svoju obchodnú stratégiu z B2B na B2C (Dias & Silva, 2024). V dôsledku toho vznikli štyri odlišné kategórie letísk od Letiska 1.0 až po Letisko 4.0. Na Obrázku 2 je možné vidieť postupnosť vývoja digitalizácie letísk až po Letisko 4.0, ktoré je v dnešnej dobe považované za inteligentné letisko.

Každé letisko možno považovať za inteligentné letisko, ak má integrované IoT zariadenia s kybernetickou bezpečnosťou na zlepšenie letiska s cieľom zlepšiť efektívnosť, bezpečnosť a produktivitu, ako aj kvalitu služieb (Yaqoobi, 2019). Podľa Heritage a Kováčikovej, existuje mnoho príkladov inteligentných letiskových aplikácií, ako sú automatické brány, rozpoznávanie tváre, upratovanie a čistenie, autonómne vozidlá na presun cestujúcich, automatizované roboty, samoobslužné kiosky a označovanie batožiny a mobilné letiskové aplikácie (Heritage, 2020) (Kovacikova, et al., 2021).

2.3. Spokojnosť zamestnancov

Spokojnosť zamestnancov sa začala rozlišovať ako samostatná oblasť štúdií od 20. rokov 20. storočia v spojení so vznikom pracovnej spokojnosti ako študijného odboru (Ay, et al., 2024). So začiatkom výskumu v tejto oblasti boli navrhnuté rôzne definície. Napríklad ako „pocit šťastia, ktorý prebúda v zamestnancovi oddanosť voči jeho práci a organizačnému prostrediu“ alebo „miera, do akej sa zamestnanci cítia harmonicky so svojou prácou a pracovným prostredím“ (Korkmaz & Erdoğan, 2014). Na zistenie vplyvov spokojnosti boli vykonané, spolu s týmito definíciami, rôzne štúdie a zistilo sa, že spokojnosť zamestnancov má pre zamestnávateľa mnoho výhod (Ay, et al., 2024). Ak sa udržiava priemyselná stabilita, zvyšuje sa úroveň motivácie aj angažovanosť zamestnancov voči organizácii a tým sa zlepšuje ich výkon.

3. Analýza súčasného stavu riešenej problematiky

3.1. AI

Na svetovom veľtrhu cestovného ruchu ITB Berlín 2024, spoločnosť Qatar Airways, ktorá prevádzkuje leteckú spoločnosť v Qatar Airways Group, predstavila svoju druhú generáciu virtuálneho člena posádky s názvom Sama 2.0 (Qatar Airways, 2024). Sama, čo v arabčine znamená obloha, je AI vyvinutá v spolupráci so spoločnosťou Uneeq, ktorá je lídrom v oblasti digitálnych ľudských technológií AI. Na rozdiel od iných AI nástrojov služieb zákazníkom, ako sú napríklad chatboty, Sama 2.0 využíva pokročilú konverzačnú AI, aby ponúkla ľudskejší a interaktívnejší spôsob komunikácie (Qatar Airways, 2024). Jej systém je dynamický a postupne zvyšuje svoj výkon prostredníctvom spätnej väzby od cestujúcich s cieľom poskytnúť presnejšie a relevantnejšie reakcie. Taktiež je schopná odpovedať na otázky v reálnom čase a poskytovať informácie o často kladených otázkach, destináciách alebo zákazníckej podpore (Qatar Airways Sama, 2025).

3.2. Samoobslužné kiosky a odbavenie batožiny

Okrem technológie AI, spoločnosť MATAR, ktorá riadi prevádzku letísk Hamad a Doha a je tiež súčasťou Qatar Airways Group, od

roku 2018 implementuje na medzinárodnom letisku Hamad samoobslužné kiosky a samoobslužné odbavenie batožiny, aby zvýšili pohodlie cestujúcich a vyhlili sa čakaniu v dlhých radoch (Future Travel Experience, 2018). Kombinácia samoobslužných pultov na odovzdanie batožiny so samoobslužnými odbavovacími kioskmi umožňuje cestujúcim vytlačiť si palubné lístky a štítky na batožinu predtým, ako budú môcť samostatne odovzdať svoju batožinu, čo zefektívňuje proces odbavenia a zvyšuje celkovú efektivitu cestovania. Tieto zariadenia sú veľkým technologickým pokrokom a umožňujú cestujúcim samostatne sa odbaviť na let len za pomoci dotykovej obrazovky bez žiadneho kontaktu so zamestnancami odbavovacích pultov.

3.3. Roboty

Úspešný dvojtypný pilotný program v júli 2023 viedol letisko Schiphol na kúpu 19 robotov na manipuláciu s batožinou (Schiphol, 2023). Tieto roboty, vyvinuté spoločnosťou Cobot Lift, slúžia na zníženie fyzickej námahy zamestnancov vykonávaním úloh zdvíhania a prenášania batožiny. Prvýkrát sa začali používať v oblasti výdajne batožiny s názvom Zuid, kde sú pracovníci pozemných služieb zo spoločností KLM, Aviapartner a Viggo zodpovední za spracovanie batožiny pre odlietajúcich cestujúcich na európskych letoch (Schiphol, 2023). Roboty počas pilotného testovania preukázali bezchybnosť pri zdvíhaní 80 – 90 % celkovej batožiny, čo viedlo k lepšej efektívite a zníženiu pracovného zaťaženia (Schiphol, 2023).

3.4. Autonómne vozíky

Britská spoločnosť Aurigo, so špecializáciou na autonómne vozidlá, v roku 2019 zaviedla ako prvá na svete autonómne vozíky na prepravu batožiny (Aurigo, 2019). Dosiahla to v spolupráci s International Airlines Group (IAG) a British Airways pomocou prestavby štandardného batožinového vozíka na autonómny elektrický vozík s podporou technológie pokročilého merania hĺbky obrazu (LIDAR) a GPS.



Obrázok 2: Autonómny vozík, zdroj: (Aurigo, 2019)

Autonómny vozík funguje nezávisle od ostatných, čo zvyšuje flexibilitu a efektivitu manipulácie s batožinou. Toto riešenie urýchľuje postupy nakladania a vykladania batožiny a znižuje potreby na rozsiahle počty ťahačov a vozíkov, čo vedie k finančným úsporám a ekologickej prevádzke letísk. Finálnu podobu zariadenia môžeme vidieť na Obrázku 5.

3.5. Diaľkovo ovládané výtlačné vozidlá

Ďalšiu významnú technológiu, ktoré letisko Heathrow prijalo, boli plne elektrické, diaľkovo ovládané, výtlačné vozidlá lietadiel s názvom Mototok, ako súčasť svojej dlhodobej stratégie na elimináciu emisií a zlepšenie prevádzkovej efektívnosti (British Airways, 2019).



Obrázok 3: Diaľkovo ovládané výtlačné vozidlo Mototok, zdroj: (British Airways, 2017)

Tieto plne elektrické vozidlá nahradili tradičné dieselové výtlačné vozidlá a umožňujú presné manévrovanie s lietadlom pomocou diaľkového ovládania, tým pádom má pracovník pozemnej obsluhy výborný rozhľad na situáciu okolo lietadla. Zariadenie v prevádzke na letisku je možné vidieť na Obrázku 3.

3.6. Qatar Airways Group

Qatar Airways Group s posledných rokov výrazne podporuje rozvoj národných talentov, aby uspeli v medzinárodnom obchodnom prostredí, čím prispieva k cieľom Katarskej národnej vízie 2030. Táto vízia zaväzuje štát Katar, do roku 2030, dosiahnuť vzdelanú, fyzicky a duševne zdravú populáciu a schopnú a etickú pracovnú silu (International Media Office, 2008). Počas rokov 2023 a 2024 sa Qatar Airways Group venovala rozvoju líderstva implementáciou viacerých iniciatív, pričom jednou z nich bol program „Qatarisation“. Tento program predstavuje tzv. katarizáciu ľudí, ktorý podporuje národný rozvoj talentov prostredníctvom prispôbeného školenia a kariérneho postupu (Qatar Airways, 2019).

3.7. Letisko Schiphol

Stratégia letiska Schiphol na rok 2024 zahŕňala úsilie o zvýšenie kvality práce zamestnancov pre služby ako sú čistenie, bezpečnostné služby a prevádzka taxislužby (Royal Schiphol Group, 2024). Dosiahlo sa to začlenením jasných minimálnych požiadaviek a kritérií na vyhodnotenie ponúk do procesov obstarávania a verejnej súťaže. Nové kritériá boli vyvinuté s cieľom podporovať dôstojné a atraktívne podmienky zamestnania, ktoré zahŕňajú spravodlivý a primeraný príjem, predvídateľný a stabilný pracovný čas a bezpečné a zdravé pracovné prostredie (Royal Schiphol Group, 2024). Tieto kritériá sú navrhnuté nielen na zlepšenie spokojnosti v práci, ale aj na to, aby sa z letiska Schiphol stalo viac atraktívne a konkurencieschopné pracovisko.

3.8. Letisko Heathrow

V posledných rokoch sa letisko Heathrow zaoberalo digitalizáciou procesov ľudských zdrojov za cieľom zlepšiť rozvoj a udržateľnosť zamestnancov. Zavedený program „Career Champions“ poskytoval digitálne kariérne poradenstvá, čím viedol k účasti 300 zamestnancov a umožnil absolventom tohto programu z roku 2022 presunúť sa na manažérske pozície (Heathrow Airport Holdings, 2024). Taktiež, prostredníctvom tohto programu, letisko Heathrow založilo do roku 2025 kampaň pre absolventov, ktorá ukazuje odhodlanie letiska rozvíjať digitálnu kariéru zamestnancov.

4. Cieľ a metodika

Hlavným cieľom práce je analyzovať ako digitalizácia mení zamestnanosť v leteckej doprave a navrhnúť odporúčania pre adaptáciu zamestnancov a spoločností na tieto zmeny. Práca je zameraná na analýzu vplyvu digitálnych technológií na zamestnancov a zamestnanosť, ako aj pozitívne aj negatívne dopady na pracovný trh. To zahŕňa zmeny prijímacích kritérií na pracovné pozície, očakávania zamestnancov od digitálnych technológií, spôsoby riešenia nedostatkov alebo náhrad zamestnancov pre zefektívnenie procesov a celkovej spokojnosti zamestnancov na pracovisku. Výsledky analýzy ponúkajú praktické odporúčania pre lepšiu integráciu digitalizácie do pracovného prostredia.

Na získanie informácií, ohľadom teoretických východísk riešenej problematiky, boli využívané zdroje, ktoré sa týkali výhradne prípadových štúdií, záverečných prác, článkov z konferencií a odborných článkov. Táto odborná literatúra bola vyhľadávaná bibliografickou databázou Google Scholar. Analýzu súčasného stavu problematiky bola vypracovaná pomocou obsahových analýz výročných správ za pomoci prípadových štúdií a odborných článkov leteckých spoločností a letísk. Výsledky boli vypracovávali pomocou získaných informácií a vedomostí z teoretickej časti a časti analýz súčasného stavu digitalizácie.

5. Výsledky práce

5.1. Vplyv digitalizácie na jednotlivé pracovné pozície v leteckej doprave

5.1.1. Členovia posádky

Digitalizácia pomocou AI dokáže dopĺňať službami a informáciami výkon práce členmi posádky službami. Tieto činnosti sa týkajú oboznamovania cestujúcich o jednotlivých informáciách letu, konkrétnych procesoch a bezpečnostných opatreniach na vstup do lietadla, ako aj o možných benefičných programoch častého lietania s danou spoločnosťou. V aktuálnom štádiu sa zatiaľ neuvažuje o nahrádzaní pozícií členov posádky, práve naopak, majú byť iba doplnení pomocou virtuálneho člena posádky. Toto riešenie má vplyv dlhodobého charakteru na výkon práce členov posádky, nakoľko pri plnom využití tejto technológie, sa budú stretávať čoraz menej s komunikáciou s pasažiermi.

5.1.2. Pracovníci pozemnej obsluhy

Analýzou vplyvu digitalizácie na pracovníkov pozemnej obsluhy sme zistili, ako dnešné digitálne technológie dokážu uľahčiť

alebo nahradiť ich výkon práce. Jedna z technológií tejto kategórie je zdvíhacie pomocné zariadenie, ktoré poskytuje pomocnú plošinu pri zdvíhaní a prenášaní batožín medzi kontajnermi s prichádzajúcou batožinou a batožinovým pásom. Pomocou tohto zariadenia, pracovníci pozemnej obsluhy vedú jednoduchšie a rýchlejšie prenášať batožiny pri nižšom zaťažení, čo podporuje ich spokojnosť a zotrvanie v zamestnaní. Zamestnávateľ tým pádom dokáže zabrániť pracovným úrazom pri manipulácii s batožinou, čím zvyšuje efektivitu a stabilitu pracoviska voči vedľajším nežiadúcim vplyvom pri výkone práce.

Pri manipulácii s batožinou sa pracovníci pozemnej obsluhy dokážu stretnúť aj s robotmi a robotickými ramenami, ktoré postupne preberajú činnosť človeka v batožinovej hale. Tieto zariadenia dokážu prenášať takmer každú batožinu bezchybne, čím ich využitie v prevádzke výrazne zrýchľuje a zefektívňuje procesy manipulácie s batožinou. Nakoľko sú roboty presnejšie a výkonnejšie ako človek, letiská postupne prechádzajú na automatizáciu manipulácie s batožinou, čo má za dôsledok hromadných výpovedí zo strany zamestnávateľa z dôvodu náhrady pracovníkov robotmi.

5.1.3. Pracovníci odbavovacích pultov

Vypracovaním našej analýzy sme zistili, akým spôsobom ovplyvňujú samoobslužné kiosky pracovníkov odbavovacích pultov. Cieľom samoobslužných kioskov je zredukovať počty cestujúcich pri čakaní na odbavenie batožín. Pomocou dotykových obrazoviek sa dokáže cestujúci sám odbaviť a tak prejsť k samoobslužnému odbaveniu batožiny, ktoré dáva rovnakú možnosť cestujúcim znížiť čakacie doby v radoch. Týmto zariadeniami sa znižuje zaťaženie a stres zamestnancov z veľkého množstva cestujúcich.

5.2. Identifikácia pozitívnych a negatívnych dopadov digitalizácie na pracovný trh

Medzi pozitívne dopady patrí digitalizácia služieb súvisiacich s ľudskými zdrojmi, ktorá zabezpečuje ich lepší prístup zamestnancom a manažérom. Pomocou nej bolo možné vytvoriť digitálne systémy na získavanie spätnej väzby od zamestnancov, čím spoločnosti dokážu aplikovať rôzne opatrenia na zlepšenie angažovanosti zamestnancov. Taktiež zavedenie centralizovanej mobilnej aplikácie na poskytovanie služieb ľudských zdrojov, zvyšuje spokojnosť a efektivitu zamestnancov, nakoľko sa zbavuje fyzických návštev oddelení ľudských zdrojov, čím taktiež prispieva k zotrvaní v zamestnaní kvôli týmto výhodám. Rovnako sa zbavuje zbytočnej byrokracie, keďže poskytuje všetky služby v digitálnej forme.

Medzi negatívne dopady patrí náhrada pracovných pozícií v dôsledku automatizácie. Digitálne technológie, ako autonómne roboty a systémy, nahrádzajú zamestnancov vo výkonoch prác na letisku. Keďže tieto zariadenia sú presnejšie, efektívnejšie, rýchlejšie a menej závislé na nákladoch, spoločnosti ich implementujú do svojich pracovísk na zautomatizovanie, zrýchlenie a zjednotenie procesov. Náklady na tieto zariadenia voči zamestnancom sú rozdielne, nakoľko zamestnávateľ potrebuje vyplatiť za každého zamestnanca k samotnej výplate aj odvody, poistenia alebo sporenia, zatiaľ čo na prevádzku robotov má spoločnosť náklady za spotrebu elektrickej energie a prípadné údržby zariadení.

5.3. Porovnanie zistení

Zistenia článku sme porovnali s prípadovou štúdiou od Bašar, ktorá sa zameriavala na zisťovanie vzťahov medzi digitalizáciou na spokojnosťou zamestnancov v letectve (Bašar & Arkan, 2023). Táto štúdia zahŕňala výskumné hypotézy na zisťovanie spokojnosti zamestnancov v jednotlivých spoločnostiach.

Tabuľka 1: Porovnanie zistení s prípadovou štúdiou, zdroj: autor

P.č.	Zistenia štúdie	Naše zistenia
1	Letecké spoločnosti využívajú výhody digitálnych zariadení na zvýšenie príjmov, zabezpečenie prevádzkového rozvoja a podporu inovácie (Bašar & Arkan, 2023).	Zhodujú sa
2	Od budúcich zamestnancov sa požaduje a vyžaduje mať digitálny súbor zručností v súlade s kritériami vo fáze náboru (Bašar & Arkan, 2023).	Zhodujú sa
3	Zamestnanci čelia stresu z hľadiska prepúšťania a osobného kariérneho rozvoja (Bašar & Arkan, 2023).	Zhodujú sa
4	Digitalizácia ľudských zdrojov má pozitívne účinky, ako je úspora času v porovnaní s tradičnými metódami (Bašar & Arkan, 2023).	Zhodujú sa
5	Prispievajú k osobnému rozvoju, rozvoju kariéry a prínosu k efektívnosti práce, ovplyvňuje spokojnosť manažérov, medziľudské vzťahy a pracovné podmienky (Bašar & Arkan, 2023).	Čiastočne sa zhodujú

Zistenia štúdie či už pozitívne alebo negatívne, boli následne porovnané s článkom za pomoci Tabuľky 1, ktorá ukazuje, akým spôsobom sa zhodujú tieto porovnania.

V zistení č.1 sa zistenia zhodujú, keďže letecké spoločnosti implementujú digitálne technológie namiesto zamestnancov kvôli ich zvýšeniu zárobkov, resp. zníženiu nákladov. Taktiež týmto prístupom podporujú implementáciu inovácií na pracoviskách, čím dosiahnu prevádzkový rozvoj.

Zistenie č.2 sa taktiež zhoduje, nakoľko článok uvádza možné navýšenia kritérií, ktoré musia spĺňať uchádzači o budúce zamestnanie, keďže zamestnávateľ vopred očakáva určité pracovné zručnosti na výkon danej práce.

Zistenie č.3 sa zhoduje kvôli nahrádzaniu zamestnancov digitálnymi technológiami, ktoré ovplyvňujú spokojnosť zamestnancov na pracovisku. Toto zistenie úzko súvisí so zistením č.1, keďže spoločnosti budú buď preferovať zvýšenie zárobkov alebo zlepšenie spokojnosti zamestnancov voči ich náhradám za digitálne technológie.

Zistenie č.4 je plne podporované, nakoľko sa zhoduje s článkom, keďže spomína, ako digitalizácia ľudských zdrojov prispieva k zníženiu všetkých čakacích dôb na ich pracoviskách. Tieto čakacie doby sú nahradené jednoduchým prístupom v mobilnej aplikácii.

Zistenie č.5 sa čiastočne zhoduje so zisteniami, nakoľko je obsiahnutý len vplyv inovatívnych programov jednotlivých spoločností na rozvoj zamestnancov a ich posun na vyššie manažérske pozície. V článku nie je nezistené, akým spôsobom rozvoj zamestnancov vplyva na medziľudské vzťahy, ani spokojnosť manažérov.

Týmto porovnávaním zistení bolo dokázané potvrdiť správny zber údajov z odborných zdrojov, ich následné využitie v analýze a následné poskytnutie výsledkov.

5.4. Odporúčania pre lepšiu integráciu digitalizácie do pracovného prostredia

5.4.1. Stanovenie hraníc stability medzi zamestnancami a digitálnymi technológiami

Na základe analýz a predchádzajúcich výsledkov sa odporúča spoločnostiam zaviesť myšlenú hranicu medzi počtami zamestnancov a digitálnych technológií na pracovisku. Táto hranica by predstavovala maximálne množstvo digitálnych technológií, ktoré by bolo prijateľné implementovať medzi počty zamestnancov počas prevádzky. Príkladom implementácie tohto odporúčania môže byť taký, že pri každom nástupe zamestnancov na zmenu sa pomocou vopred určených tabuliek zamestnávateľom informujú, koľko môže byť naraz spustených týchto zariadení, ktoré vykonávajú prácu za nich alebo im pomáhajú. Takýmto riešením by sa dalo zamedziť zhoršenie spokojnosti zamestnancov, keďže automatizácia nahrádza pracovné pozície robotmi.

5.4.2. Zvýšenie prijímania spätnej väzby od zamestnancov

V analýze súčasných trendov zamestnanosti zaujal prístup vytvorenia systému na získavanie spätnej väzby od zamestnancov. Nakoľko sú to práve zamestnanci, ktorí sa ako prví stretávajú s digitalizáciou na pracovisku a pociťujú jej krátkodobé a dlhodobé vplyvy, našim odporúčaním je implementovať túto službu do každej leteckej spoločnosti. Zamestnanci by nemali byť odhodení od starostí zamestnávateľa, skôr by sa mal zaujímať o ich pocity a predstavy o vplyve digitalizácie na pracovisku. Spoločnosť nemá ako iným spôsobom zistiť či sú zamestnanci proti implementácii digitálnych technológií ale nie, okrem mesačných, alebo až ročných záznamov.

5.4.3. Pravidelné školenia o digitálnych technológiách

Taktiež podľa analýzy súčasných trendov je povšimnuté, že spoločnosti využívajú rôzne programy alebo školenia na rozvoj zamestnancov. Skôr by bolo odporúčanie vykonávať pravidelné školenia zamestnancov zamerané priamo na súčasné alebo budúce digitálne technológie. Nie každá spoločnosť dokáže plnohodnotne oboznámiť zamestnancov o svojich implementovaných digitálnych technológiách, nakoľko väčšinou od nich očakáva už po prijímacom konaní, že majú dostatočné znalosti, či už na ich prevádzku alebo obsluhu. Samozrejme, zamestnávateľ musí zabezpečiť základné školenie zamestnancov kvôli bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci, ale navyše informácie ohľadom možných vplyvov na zamestnancov nemusí odprednášať. Preto by zamestnanci mali byť navyše školení kvôli pochopeniu digitálnych technológií.

6. Záver

Článok oboznámil s digitalizáciou a jednotlivými technológiami, ktoré formujú digitálne pracoviská leteckej dopravy a akým spôsobom sú v nich implementované. Ďalej sme poskytli historický prehľad digitalizácie, ako začala od Priemyslu 1.0, následne z neho bola adaptácia na leteckú dopravu Letectvo 1.0, ktoré pokračovalo až do Letectva 4.0, rovnako aj letiská, ktoré sú v súčasnosti definované ako inteligentné letiská. Charakterizovali sme pracovný trh a definovali spokojnosť zamestnancov.

V časti analýzy sa článok zaoberal súčasným stavu digitalizácie, v ktorom sa zamerail na súčasné digitálne technológie využívané v leteckých spoločnostiach a letiskách. Tieto technológie uľahčujú prácu zamestnancom, nakoľko ich dokážu nahradiť v čiastočnej alebo plnej miere. Avšak, náhrada zamestnancov má aj negatívny dopad na zamestnanosť, keďže počet pracujúcich zamestnancov klesá s počtom implementovaných digitálnych technológií. Následne sa zamerail na analýzu súčasných trendov rovnakých spoločností a letísk, kde sme zistili spôsoby rozvoja zamestnancov, digitalizácie ľudských zdrojov, zlepšenia pracovných podmienok a úprav kritérií na prijatie uchádzačov do zamestnania.

V poslednej časti, pomocou teoretických znalostí a analýzy súčasného stavu digitalizácie, sú v článku uvedené výsledky. Najprv uviedol vplyv digitalizácie na jednotlivé pracovné pozície a akým spôsobom zasahuje do ich výkonov prác. Následne identifikoval pozitívne a negatívne dopady digitalizácie na pracovný trh, ktoré zahŕňali zefektívnenie procesov ale aj zánik pracovných pozícií. Ďalej porovnaním zistení s prípadovou štúdiou uviedol, ako je zber údajov dôveryhodný. Na záver článok ponúkol odporúčania, ktorými by letecká doprava dokázala lepšie integrovať digitalizáciu na zjednodušenie procesov, čím by AI vedela o pár rokoch nahradiť pracovnú silu. Avšak, netreba zabúdať na to, aby ľudia neodovzdali celoživotné ľudské úsilie AI, lebo pri nadmernom využití tejto digitálnej technológie by dokázala autonómne preberať kontrolu pomocou spolupráce s ďalšími technológiami.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 54ŽU-4/2025 "Možnosti využitia umelej inteligencie v študijnom programe letecká doprava pri výučbe pilotov a technikov údržby. (SmartSkyEdu)"

Referencie

A-ICE, 2024. *Common Use Terminal Equipment (CUTE)*. [Online] Available at: <https://www.a-ice.aero/home/glossary-of-aviation-terms/common-use-terminal-equipment-cute/> [Cit. Marec 2025].

Aurigo, 2019. *Aurigo delivers autonomous 'baggage' solution for Heathrow*. [Online] Available at: <https://aurigo.com/aurigo-delivers-autonomous-baggage-solution-for-heathrow/> [Cit. Apríl 2025].

Ay, Ş., Körmeçli, C. & Kedersiz, A., 2024. *The impact of digitalization level on job satisfaction and employee*. [Online]

Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14563540> [Cit. December 2024].

Başar, P. & Arkan, G., 2023. *The Relations Between Digitalization and Employee Satisfaction in Aviation*. [Online] Available at: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jav/issue/80293/1307693> [Cit. December 2024].

British Airways, 2017. *Mototok pushes back an aircraft at Heathrow T5*. [Online] Available at: <https://mediacentre.britishairways.com/image/details/78024> [Cit. Apríl 2025].

British Airways, 2019. *British airways' remote-control pushback vehicles reach record 100,000 departures*. [Online] Available at: <https://mediacentre.britishairways.com/news/15082019/british-airways-remote-control-pushback-vehicles-reach-record-100000-departures> [Cit. Apríl 2025].

Dias, C. A. S., 2024. *Smart Airports: Analysing Digital Transformation and Technological Advancements in Aviation*. [Online] Available at: https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/14837/1/10524_25377.pdf [Cit. Marec 2025].

Dias, C. & Silva, J., 2024. *Unveiling the future: Smart airports - applications, advantages, strategies and technological challenges*. [Online] Available at: <https://doi.org/10.3926/jairm.419> [Cit. Marec 2025].

Future Travel Experience, 2018. *How Hamad Airport is creating "a single biometric system" to optimise operational efficiency*. [Online] Available at: <https://www.futuretravelexperience.com/2018/12/hamad-airport-single-biometric-system-optimise-efficiency/> [Cit. Apríl 2025].

Heathrow Airport Holdings, 2024. *Annual Report 2024*. [Online] Available at: https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/investor/reports-and-presentations/annual-accounts/airport-holdings/HAHL_ARA_2024.pdf [Cit. Apríl 2025].

Heritage, S., 2020. *Smart Airports*. [Online] Available at: <https://cdn.github.org/umbraco/media/3599/45-smart-airports.pdf> [Cit. Apríl 2025].

International Media Office, 2008. *Qatar National Vision 2030*. [Online] Available at: <https://imo.gov.qa/state-of-qatar/qatar-national-vision-2030/> [Cit. Apríl 2025].

- Korkmaz, O. & Erdoğan, E., 2014. *The Effect of Work Life Balance on Organizational Commitment and Employee Satisfaction*. 4 ed. s.l.:Edge Academic Review.
- Kovacikova, M., Janoskova, P. & Kovacikova, K., 2021. *The comparison of digitalization of Slovak Airports within the digital transformation of European Union countries*. [Online] Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.111> [Cit. Marec 2025].
- Molchanova, K., 2021. *A Review of Digital Technologies in Aviation Industry*. [Online] Available at: <https://bibliotekanauki.pl/articles/1797206.pdf> [Cit. Marec 2025].
- Molchanova, K., Trushkina, N. & Katerna, O., 2020. Digital platforms and their application in the aviation industry. In: *Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management 3*. s.l.:s.n., pp. 83-98.
- Mutlu, I., Hartigh, E. d. & Ucler, C., 2022. *Digital Technology and the Stages of Digital Business Transformation*. [Online] Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10033256> [Cit. Marec 2025].
- Nau, J. B. & Benoit, F., 2017. Smart Airport: How Technology is shaping the future of airports. In: *Wavestone*. Paríž: s.n.
- Qatar Airways Sama, 2025. *QVerse*. [Online] Available at: <https://www.qatarairways.com/html/redirect/QR/qverse/check-in?lang=en> [Cit. Apríl 2025].
- Qatar Airways, 2019. *Al Darb Qatarisation*. [Online] Available at: <https://www.qatarairways.com/en-us/nationalisation.html> [Cit. Apríl 2025].
- Qatar Airways, 2024. *Qatar Airways Showcases New Features of World's First AI Virtual Digital Human Cabin Crew*. [Online] Available at: <https://www.qatarairways.com/press-releases/en-WW/235307-qatar-airways-showcases-new-features-of-world-s-first-ai-virtual-digital-human-cabin-crew#> [Cit. Apríl 2025].
- Reis, J. a iní, 2020. *Digitalization: A Literature Review and Research Agenda*. [Online] Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-43616-2_47 [Cit. Február 2024].
- Royal Schiphol Group, 2024. *Trends and Developments*. [Online] Available at: https://assets.ctfassets.net/biom0eqyyi6b/4c0y5tBDB9M180ChVLdx8o/f4104c83dea8b7ee52da85d59f4a02a1/Trends_and_developments.pdf [Cit. Apríl 2025].
- Schiphol, 2023. *Amsterdam Airport Schiphol to fast-track the use of baggage robots after successful pilot project*. [Online] Available at: <https://news.schiphol.com/amsterdam-airport-schiphol-to-fast-track-the-use-of-baggage-robots-after-successful-pilot-project/> [Cit. Apríl 2025].
- Schumacher, A., Sihn, W. & Erol, S., 2016. *Automation, digitization and digitalization and their implications for manufacturing processes*. [Online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/318877006_Automation_digitization_and_digitalization_and_their_implications_for_manufacturing_processes [Cit. Marec 2025].
- Yaqoobi, M. H., 2019. *SMART AIRPORT: HOW IOT AND NEW TECHNOLOGIES SHAPING THE FUTURE OF AIRPORT INDUSTRY*. [Online] Available at: <https://hadiyaqoobi.github.io/Graduation-project/documents/Thesis%202.1.pdf> [Cit. Marec 2025].



POKROČILÁ AERODYNAMIKA VÝŠKOVÝCH BEZPILOTNÝCH LIETAJÚCICH SYSTÉMOV (UAV)

Maroš Benka
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Pavol Pecho
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article deals with the advanced aerodynamics of high-altitude long-endurance unmanned aerial vehicles (HALE UAVs). The aim of the work was to analyze the current knowledge in the field of stratospheric flights and, based on the obtained results, to design a theoretical model of an unmanned aerial vehicle capable of stratospheric flight for specialized applications. The thesis analyzes the specific conditions of stratospheric flight, including low air density, low Reynolds numbers, potential compressibility effects, and reduced control surface effectiveness. Existing HALE UAV systems (e.g., Helios, Zephyr, PHASA-35) and their aerodynamic challenges are examined. Within the scope of the work, a theoretical UAV model with a 10-meter wingspan, S1223 airfoil, and V-tail configuration was designed using Autodesk Inventor software. The aerodynamic performance of the designed model was verified using CFD simulation in ANSYS Fluent software for flight conditions at an altitude of 20 km (temperature 216.65 K, pressure 5.5 kPa, speed 25 m/s) employing the $k-\omega$ SST turbulence model and the NIST Real Gas model. The simulation demonstrated the model's ability to generate a lift of 512.5 N with a drag of 38.2 N, allowing it to carry a payload of approximately 12 kg with a total drone weight of 40.2 kg. The achieved L/D ratio is 13.42, confirming the good aerodynamic efficiency of the design for the given conditions. In conclusion, it is stated that stratospheric flight presents significant aerodynamic challenges mainly due to low air density, but the designed model demonstrated potential for specialized missions. Successful HALE UAV design requires a comprehensive and integrated approach combining aerodynamics, structures, materials, propulsion, and control systems.

Keywords

Unmanned Aerial Vehicles, HALE UAV, Stratosphere, Low Reynolds Number Aerodynamics, UAV Design

1. Úvod

Bezpilotné lietajúce systémy, najmä tie určené pre operácie vo veľkých výškach s dlhou vytrvalosťou (HALE), predstavujú dynamicky sa rozvíjajúcu oblasť leteckej techniky. Tieto systémy, operujúce v stratosfére vo výškach presahujúcich 15 až 20 kilometrov [20, 28], ponúkajú unikátne schopnosti pre dlhodobé misie, ako sú diaľkový prieskum Zeme, monitorovanie životného prostredia, meteorologické merania, poskytovanie komunikačných služieb či spravodajské a sledovacie operácie [4, 19, 27]. Aktuálnosť tejto témy podčiarkuje rýchly technologický pokrok a vývoj systémov ako Airbus Zephyr, BAE Systems PHASA-35 či Aero Vironment Horus A [6, 7, 15]. Napriek značnému pokroku však návrh a prevádzka HALE systémov čelia špecifickým a komplexným výzvam z extrémnych podmienok stratosférického prostredia. Kľúčovým problémom je aerodynamika v podmienkach veľmi nízkej hustoty vzduchu [23, 28]. To vedie k letu pri nízkych Reynoldsových číslach [29, 31, 32], čo spôsobuje dominanciu viskózných efektov, vznik laminárnych separačných bublín, zvýšenú citlivosť na odtrhnutie prúdenia a potenciálne nelineárne aerodynamické správanie [31, 32, 36]. Súčasne, potreba generovať dostatočný vztlak v riedkom vzduchu si často vyžaduje let pri vyšších pravých vzdušných rýchlostiach, čo môže viesť k relevantným Machovým číslam a nástupu efektov stlačiteľnosti [30, 37]. Ďalšou výzvou je znížená účinnosť konvenčných riadiacich plôch v dôsledku nízkeho dynamického tlaku [41]. Požiadavka na nízku hmotnosť a veľké rozpätia krídel prináša problémy v oblasti aeroelasticity a štrukturálnej integrity [2, 26, 39]. Cieľom tejto práce bolo analyzovať aktuálne poznatky z oblasti aerodynamiky letov v stratosfére a na základe týchto poznatkov navrhnúť a

aerodynamicky zhodnotiť teoretický koncept vonkajšieho tvaru bezpilotného lietajúceho prostriedku.

1.1. Analýza výškových bezpilotných lietajúcich systémov (UAV)

Výškové bezpilotné lietajúce systémy (UAV), známe aj ako High-Altitude Long Endurance (HALE) UAV, predstavujú špecifickú kategóriu leteckej techniky určenú na operácie vo výškach nad 15 km [23]. Tieto systémy sa vyznačujú schopnosťou dlhodobého letu, nízkou spotrebou energie a vysokou efektivitou pri plnení misií, ako sú diaľkový prieskum, meteorologické merania, komunikácia či monitorovanie [4, 19, 27]. Prevádzka v stratosfére prináša extrémne podmienky – nízku hustotu vzduchu, teploty pod -50°C a intenzívne slnečné žiarenie [21, 24], čo kladie vysoké nároky na aerodynamiku, konštrukčné materiály a pohonné systémy. Tento článok analyzuje kľúčové projekty v oblasti HALE UAV, ich aerodynamické vlastnosti a technologické inovácie.

1.2. NASA Helios: Priekopník stratosférického letu

Projekt NASA Helios (HP03-2) bol jedným z prvých pokusov o dlhodobý stratosférický let poháňaný solárnou energiou [2, 3]. V roku 2001 dosiahol rekordnú výšku 29 524 m [3], čím demonštroval potenciál HALE UAV. Helios využíval solárne články a palivové články na báze vodíka, no jeho nehoda v roku 2003 odhalila kritické aerodynamické a aeroelastické výzvy [2, 3].

1.2.1. Kľúčové aerodynamické problémy

- Aeroelasticita a dihedrálny uhol: Flexibilná štruktúra krídla s rozpätím 247 stôp a aspektovým pomerom 31 reagovala na turbulencie neočakávaným ohnutím, čo viedlo k dihedrálnemu uhlu až 40 stôp [2]. To spôsobilo redistribúciu vztľaku a nestabilitu.
- Nestabilný fugoidný režim: Vysoký dihedrál vyvolal divergentné kmitanie s periódou 8–9 sekúnd, zvyšujúce rýchlostné výkyvy [2]. Nestabilita bola spôsobená posunom aerodynamického centra a nárastom momentu zotrvačnosti.
- Citlivosť na turbulencie: Malé poryvy (0,5 ft/s) spôsobili trvalé deformácie krídla, ktoré sa nevrátilo do pôvodného tvaru [2].
- Prekročenie návrhovej rýchlosti: Počas strmhlavého pádu rýchlosť dvojnásobne prekročila návrhovú hodnotu, čo viedlo k zlyhaniu štruktúry [2]. Nehoda Heliosu zdôraznila potrebu pokročilých aeroelastických simulácií a robustných riadiacich systémov pre HALE UAV.



Obrázok 5 NASA Helios

Zdroj: https://archive.org/details/370731main_ED03-0152-2

1.3. Airbus Zephyr: Rekordér v dĺžke letu

Airbus Zephyr, konkrétne model Zephyr 8/S, je solárne poháňané UAV typu HAPS (High-Altitude Platform Station) [4, 42]. V roku 2022 dosiahol rekordnú výdrž 64 dní [6], čím prekonal Helios. Zephyr operuje vo výškach nad 20 km [19] a je navrhnutý na misie ako pozorovanie Zeme, komunikácia a prieskum [42].

1.3.1. Aerodynamické vlastnosti

Vysoký aspektový pomer: Krídlo s rozpätím 25 m a hmotnosťou 60 kg (aspektový pomer ~ 31) znižuje indukovaný odpor a zvyšuje pomer vztľaku k odporu ($L/D > 20$) [19], čo je kľúčové v riedkom vzduchu (hustota $\sim 0,088 \text{ kg/m}^3$ [24]).

Solárny pohon: Solárne články (GaAs, $>1500 \text{ W/kg}$) nabíjajú batérie (435 Wh/kg) pre nočné lety [19, 42]. Dva motory (1,5 kW) poháňajú vrtule optimalizované pre nízke Reynoldsovo číslo ($\sim 10^5$) [34].

Stabilita a aeroelasticita: Krídlo s 10° dihedrálnym uhlom a twistom zlepšuje stabilitu, no je citlivé na turbulencie. Nehoda v roku 2022 po 64 dňoch bola spôsobená poruchou motora v turbulencii [6, 19].

Výškový výkon: Zephyr dosiahol 23 200 m v roku 2021 [42], s profilom krídla (pravdepodobne NACA 6-série) optimalizovaným pre laminárny tok.

Zephyr demonštruje pokrok v aerodynamickej efektívite a riadení, no ukazuje aj pretrvávajúce výzvy spojené s aeroelasticitou a stabilitou.



Obrázok 4 Start Airbus Zephyr

Zdroj: <https://mediacentre.airbus.com/element?id=555991>

1.4. BAE Systems PHASA-35: Všestranná HAPS platforma

BAE Systems PHASA-35 je solárno-elektrické UAV s rozpätím krídel 35 m a hmotnosťou 150 kg [7, 8], navrhnuté pre stratosférické misie (65 000–70 000 stôp) [7, 11]. Platforma využíva ultraľahké kompozitné materiály a GaAs solárne články [7, 13], čo umožňuje dlhodobú výdrž.

1.4.1. Technické a aerodynamické aspekty

Konštrukcia: Vysoký aspektový pomer krídla maximalizuje vztlak a minimalizuje odpor v riedkom vzduchu. Odnímateľný podvozok znižuje hmotnosť po vzlete [7, 13].

Pohon: Dva elektromotory poháňajú vrtule optimalizované pre stratosféru, s Li-ion batériami pre nočné lety [7, 13].

Testovanie: Úspešné stratosférické lety v roku 2023 a 2024 (vrátane 24-hodinového letu nad 66 000 stôp) potvrdili aerodynamickú efektívnosť a robustnosť [11, 14].

Aplikácie: PHASA-35 podporuje prieskum, komunikáciu (4G/5G) a monitorovanie, s nosnosťou do 15 kg [7, 12].

PHASA-35 kombinuje nízke prevádzkové náklady a flexibilitu, čím konkuruje tradičným lietadlám a satelitom.

1.5. AeroVironment Horus A: Nováčik s potenciálom

Horus A, vyvinutý ako vylepšená verzia Sunlideru, je solárne UAV pre vládne aplikácie [15]. Hoci technické detaily sú obmedzené, nosnosť 68 kg a výkon 1,5 kW [15], spolu s modernizovanou avionikou a autonómiou, naznačujú schopnosť niesť pokročilé senzory a vykonávať misie ako sledovanie či zálohovanie GPS.

Predpokladané aerodynamické vlastnosti

Konštrukcia: Predpokladá sa vysoký aspektový pomer a ľahká štruktúra podobná Sunlideru [15], optimalizovaná pre stratosféru [26, 39].

Výzvy: Nízka hustota vzduchu a nízke Reynoldsovo číslo vyžadujú efektívne profily krídla a minimalizáciu odporu [23, 29].



Obrázok 6 Prvý let PHASA-35 vo Woomere, február 2020

https://d3lcr32v2pp4l1.cloudfront.net/Pictures/780xany/5/9/3/67593_phasa35maidencaesystems_995632.png

1.6. Qimingxing 50: Čínsky konkurent

Čínsky Qimingxing 50 (Morning Star 50) je solárne UAV s rozpätím krídel 50 m a šiestimi motormi [16, 17], navrhnuté pre dlhodobé stratosférické misie. Jeho ultraľahká konštrukcia a solárne panely umožňujú operácie vo výške 20 km [16].

Aerodynamické riešenia

Krídlo: Dlhé a štíhle krídlo s vysokým aspektovým pomerom minimalizuje odpor a maximalizuje vztlak [17].

Stabilita: Dvojitý trup so stabilizátormi zlepšuje manévrovateľnosť [18].

Výzvy: Nízke Reynoldsovo číslo a turbulencie vyžadujú pokročilé riadiace systémy [2, 29].



Obrázok 7 Predletová príprava Horus A na let

Zdroj: https://topwar.ru/uploads/posts/2024-10/57a68bfee0_horus-2.webp

1.7. Zhrnutie

Analýza systémov ako Helios, Zephyr, PHASA-35, Horus A a Qimingxing 50 ukazuje rýchly pokrok v technológiách HALE UAV. Kľúčové výzvy zahŕňajú aeroelasticitu, stabilitu v turbulenciách

a efektívitu v riedkom vzduchu [2, 23, 29, 41]. Inovácie ako ľahké kompozitné materiály, vysoko efektívne solárne články a sofistikované riadiace systémy umožňujú dlhodobé misie s minimálnymi nákladmi [13, 19, 40]. Tieto systémy otvárajú nové možnosti pre prieskum, komunikáciu a monitorovanie, s potenciálom nahradiť tradičné lietadlá či satelity v určitých aplikáciách [4, 27].

2. Analýza podmienok letov v stratosfére

Stratosféra, rozprestierajúca sa od približne 10–12 km do 50 km nad zemským povrchom [20, 28], predstavuje unikátne prostredie pre prevádzku výškových bezpilotných lietajúcich systémov (HALE UAV). Tieto systémy operujú najmä vo výškach 15–30 km [23], kde sa stretávajú s extrémnymi podmienkami, ako sú nízka hustota vzduchu, nízke teploty a minimálna turbulencia. Tieto faktory výrazne ovplyvňujú aerodynamiku a návrh HALE UAV, čo si vyžaduje špecifické technologické riešenia.

2.1. Atmosférické vlastnosti stratosféry

Stratosféra je charakteristická stabilným prostredím s minimálnou vertikálnou konvekciou a absenciou bežného počasia [21], čo je výhodné pre dlhodobé lety. Kľúčové atmosférické parametre zahŕňajú:

Teplotný profil:

V tropopauze (okolo 11 km) teplota klesá na $-56,5^{\circ}\text{C}$ a zostáva konštantná do 20 km. Nad 20 km teplota stúpa v dôsledku absorpcie UV žiarenia ozónovou vrstvou, dosahujúc $-44,5^{\circ}\text{C}$ vo výške 30 km [24, 28]. Tento profil ovplyvňuje rýchlosť zvuku a viskozitu vzduchu.

Tlakový profil:

Tlak klesá exponenciálne – z 22 632 Pa (11 km) na 1 200 Pa (30 km), čo je menej ako 1,2 % tlaku na úrovni mora [24, 28]. Nízky tlak znižuje dynamický tlak, čím obmedzuje aerodynamické sily.

Hustota vzduchu: Hustota klesá dramaticky – z $0,364\text{ kg/m}^3$ (11 km) na $0,018\text{ kg/m}^3$ (30 km) [24, 28]. Nízka hustota komplikuje generovanie vztaku a znižuje Reynoldsovo číslo, čo ovplyvňuje prúdenie vzduchu.

Stabilita a suchosť: Teplotná inverzia potláča turbulenciu, a nízky obsah vodnej pary eliminuje tvorbu oblakov, čo zjednodušuje letové podmienky [22].

Tabuľka: Atmosférické parametre v stratosfére (ISA)

Výška (Geometrická, km)	Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	Teplota (K)	Tlak (Pa)	Hustota (kg/m^3)	Rýchlosť zvuku (m/s)	Kinematická viskozita (m^2/s)
0	15.0	288.15	101325	1.2250	340.3	1.460×10^{-6}
15	-56.5	216.65	12111	0.1948	295.1	7.316×10^{-6}
20	-56.5	216.65	5474.9	0.0880	295.1	1.616×10^{-4}
25	-51.6	221.55	2549.2	0.0401	298.4	3.470×10^{-4}
30	-46.6	226.55	1197.0	0.0184	301.7	7.573×10^{-4}

2.1.1. Aerodynamické výzvy v stratosfére

Prevádzka HALE UAV v stratosfére prináša špecifické aerodynamické výzvy, ktoré vyplývajú z nízkych Reynoldsových a potenciálne vyšších Machových čísel [29, 30].

Nízke Reynoldsovo číslo: HALE UAV operujú v režime nízkych Reynoldsových čísel ($Re \sim 10^4 - 5 \times 10^5$), kde viskózne sily dominujú [29, 31]. To vedie k:

- Laminárne separačné bubliny (LSB): Tvorba LSB zvyšuje odpor a spôsobuje nelineárne zmeny vztaku [31, 32]. Krátke bubliny ovplyvňujú lokálny tlak, dlhé menia celkové prúdenie.
- Laminárno-turbulentný prechod: Citlivosť prechodu na malé zmeny (uhol nábehu, Re) komplikuje predikciu aerodynamických vlastností [33].
- Nelineárne efekty a hysteréza: Nelineárny priebeh vztaku a hysterézne slučky (pádová a predpádová) sťažujú riadenie a zotavenie z pádu [32, 36]. Pri $Re < 100\,000$ hrozí „výkonnostný útes“ s prudkým zhoršením vlastností.

Účinky stlačiteľnosti: Vyššie pravé vzdušné rýchlosti (TAS) a nižšia rýchlosť zvuku (295 m/s v 11–20 km [24]) zvyšujú Machovo číslo ($M \sim 0,4 - 0,7$) [30, 37]. To prináša:

- Transonické prúdenie: Lokálne nadzvukové prúdenie na krídle vytvára rázové vlny, zvyšujúce vlnový odpor [30].
- Vplyv na vztlak a stabilitu: Stlačiteľnosť znižuje stúpanie krivky vztaku a mení momentové charakteristiky, čo môže spôsobiť odtrhnutie prúdenia [30].
- Kombinácia odporov: Viskózný odpor (nízke Re) a vlnový odpor (vyššie M) znižujú aerodynamickú účinnosť (L/D) [30, 31].

Generovanie vztaku: Nízka hustota vzduchu vyžaduje vyššiu TAS alebo väčšie krídla na generovanie vztaku ($L = \frac{1}{2}\rho V^2 SCL$) [23, 30]. To vedie k:

- Veľkým krídlám: Vysoký aspektový pomer minimalizuje indukovaný odpor, no zvyšuje aeroelastické riziká [26, 39].
- Vyššej TAS: Zvyšuje štruktúrne zaťaženie a problémy so stlačiteľnosťou [30, 37].
- Obmedzeniam nosnosti: Veľká plocha krídel obmedzuje podiel užitočného zaťaženia, najmä pri solárnych UAV [40].

Znížená účinnosť riadiacich plôch: Nízky dynamický tlak ($q = \frac{1}{2}\rho V^2$) obmedzuje sily generované riadiacimi plochami [30, 41]:

- Znížené momenty: Väčšie plochy alebo výchylky sú potrebné [41], no môžu spôsobiť odtrhnutie prúdenia.
- Alternatívne riadenie: Reakčné systémy (RCS) alebo presun hmoty (MMC) sú sľubné pre veľké výšky.

- Stabilita a manévrovateľnosť: Vyššia TAS znižuje aerodynamické tlmenie, čím zvyšuje náchylnosť na oscilácie [30].

2.2. Zhrnutie

Let v stratosfére predstavuje komplexné aerodynamické výzvy vyplývajúce z nízkej hustoty vzduchu, nízkych Reynoldsových čísel a potenciálnych efektov stlačiteľnosti [23, 29, 30]. HALE UAV musia byť navrhnuté s veľkými, štíhlymi krídlami, optimalizovanými profilmi a robustnými riadiacimi systémami [33, 39, 40], aby zvládli viskózne prúdenie, rázové vlny a nízky dynamický tlak. Tieto požiadavky si vyžadujú interdisciplinárny prístup, kombinujúci pokročilé materiály, aerodynamické modelovanie a inovatívne riadiace technológie [26, 45], aby sa zabezpečila efektívna a stabilná prevádzka v extrémnych podmienkach stratosféry.

3. Návrh bezpilotného lietajúceho prostriedku pre špecializované aplikácie v stratosfére

Návrh bezpilotného lietajúceho prostriedku (UAV) pre stratosférické misie vyžaduje zohľadnenie extrémnych podmienok, ako sú nízka hustota vzduchu, nízke Reynoldsove čísla a obmedzený dynamický tlak. Tento článok popisuje proces návrhu a modelovania HALE UAV s rozpätím krídel 10 m, optimalizovaného pre výšku 20 km, s nosnosťou približne 12 kg a nízkou hmotnosťou.

3.1. Požiadavky na model

Pred modelovaním boli stanovené tieto požiadavky:

- Nízka hmotnosť: Použitie uhlíkových kompozitov na minimalizáciu hmotnosti.
- Rozmery: Rozpätie krídel 10 m.
- Užitočné zaťaženie: Približne 10–12 kg.

3.2. Proces modelovania

Návrh začal aerodynamickou optimalizáciou krídel, nasledovalo modelovanie trupu a chvostových plôch v Autodesk Inventore, s následnou simuláciou v ANSYS Fluent.

3.2.1. Návrh a modelovanie krídel

Krídla boli kľúčovým prvkom kvôli potrebe generovania vztaku v riedkom vzduchu. Testovalo sa sedem variantov krídel s tromi profilmi a rôznymi uhlami nábehu:

Profily:

Selig S1223: Optimalizovaný pre vysoký vztlak pri nízkych Reynoldsových číslach [33].

Wortmann FX 63-137: Vysoký vztlak pri nízkych rýchlostiach.

Eppler E61: Dobrá rovnováha vztaku a odporu pri nízkych Re .

Uhly nábehu: 6° , 8° , 10° pre každý profil.

Profily boli importované z databázy airfoiltools.com ako súbory bodov, vytvorené ako 2D skice v rovine XZ a extrudované na

dĺžku 5 m na jedno krídlo. Rozpätie krídel bolo stanovené na 10 m.

3.2.2. Simulácie krídel

Simulácie v module Stress Analysis (Autodesk Inventor) hodnotili vztlak, odpor a deformácie pri stratosférických podmienkach [24]:

Okrajové podmienky:

Tlak: 5,5 kPa (20 km).

Teplota: -56,5 °C (216,65 K).

Rýchlosť: 25 m/s.

Model plynu: Real Gas NIST.

Typ simulácie: Statická analýza.

Výsledky:

S1223 (8°): Vztlak 512,5 N, odpor 38,2 N ($L/D \approx 13,42$).

Wortmann FX 63-137: Vztlak 418,3 N, odpor 43,1 N ($L/D \approx 9,7$).

Eppler E61: Vztlak 390 N, odpor 35,3 N ($L/D \approx 11,04$).

Profil S1223 s uhlom nábehu 8° bol vybraný pre najlepší pomer vztlaku k odporu a schopnosť generovať dostatočný vztlak.

3.2.3. Návrh základnej konštrukcie dronu

Na základe výsledkov pokračovalo modelovanie celého UAV:

- Trup: Dĺžka 5,3 m, aerodynamický tvar inšpirovaný PHASA-35, minimalizujúci odpor a poskytujúci priestor pre zaťaženie a systémy.
- Krídla: Rozpätie 10 m, profil S1223 (8°), winglety s uhlom 15° (inšpirované PHASA-35) na zníženie vírového odporu.
- Chvostové plochy: V-tail konfigurácia na zníženie hmotnosti a odporu, kombinujúca funkcie výškovky a smerovky.
- Winglety boli modelované ako samostatné súčasti, naklonené o 15°, s plynulým prechodom (nástroj Loft). V-tail bol vytvorený ako 2D skica v rovine XZ, extrudovaná do 3D tvaru.

3.2.4. Simulácie celého modelu

Model bol exportovaný do formátu STEP a testovaný v ANSYS Fluent (šablóna Fluid Flow s Fluent Meshing) pri podmienkach:

- Výška: 20 km.
- Rýchlosť: 25 m/s.
- Tlak: 5,5 kPa.
- Teplota: -56,5 °C.

Výsledky:

- Vztlak: 512,5 N.
- Odpor: 38,2 N.
- Hmotnosť UAV: 40,2 kg (ťaž 394,36 N).
- Nosnosť: 118,14 N $\approx$ 12,04 kg.
- Pomer L/D : 13,42.

Hodnota L/D 13,42 naznačuje dobrú aerodynamickú efektivitu, hoci nižšiu ako u PHASA-35 ($L/D > 20$). Nosnosť 12 kg spĺňa požiadavky.

3.2.5. Zdôvodnenie návrhových rozhodnutí

Výber profilu S1223

- Vysoký vztlak: $Cl \approx 1,8$ pri 8°, generuje 512,5 N, dostatočných pre nosnosť 12 kg.
- Nízky odpor: Odpor 38,2 N, $L/D \approx 13,42$, minimalizuje energetickú náročnosť.
- Stabilita pri nízkych Re : Redukuje laminárne separačné bubliny.
- Overené použitie: Používaný v klzákoch a malých UAV, spoľahlivé dáta.

Zamietnuté alternatívy:

Wortmann FX 63-137: Nižší vztlak (418,3 N), vyšší odpor, $L/D \approx 9,7$, náchylný na odtrhnutie.

Eppler E61: Nedostatočný vztlak (390 N), nižšia nosnosť (~6 kg).

NACA 6-séria: Horší výkon pri $Re < 5 \times 10^5$, vyšší odpor.

Výber V-tail konfigurácie

Nízka hmotnosť: O 15–20 % ľahší ako krížový chvost.

Znížený odpor: Menšia plocha, menej interferencií.

Jednoduchosť: Nižšie výrobné náklady.

Zamietnuté alternatívy:

Krížový chvost: Vyššia hmotnosť, odpor, $L/D \approx 12$.

T-tail: Aeroelastické riziká, vyššia hmotnosť.

H-tail: Zložitá stabilita, vyššie náklady.

Výber rozpätia 10 m

Kompromis vztlaku a hmotnosti: Generuje 512,5N, nosnosť 12 kg.

Nízke aeroelastické riziká: Menšia flexibilita ako pri väčších rozpätiach (napr. Helios).

Jednoduchá logistika: Praktické pre výrobu a prepravu.

Dostatočné L/D: 13,42, vhodné pre misie s menšou nosnosťou.

Zamietnuté alternatívy:

Väčšie rozpätie (15 m): Vyššia hmotnosť, aeroelastické riziká.

Menšie rozpätie (8 m): Nedostatočný vztlak (~400 N), L/D ≈ 11.

Winglety (15°)

Zníženie odporu: Redukujú vírový odpor o 10–15 %.

Zlepšenie stability: Zvyšujú laterálnu stabilitu.

Inšpirácia PHASA-35: Overený dizajn.

Zamietnuté alternatívy:

Bez winglety: Vyšší odpor, horšia stabilita.

Blended winglety: Zložitejšia výroba, vyššia hmotnosť.

Tvar trupu

Aerodynamická efektivita: Minimalizuje odpor, inšpirovaný PHASA-35.

Priestor pre systémy: Umožňuje umiestnenie zaťaženia a batérií.

Jednoduchá výroba: Znižuje náklady.

Zamietnuté alternatívy:

Valcový trup: Vyšší odpor.

Krátky trup: Obmedzený priestor, horšia stabilita.

Dvojitý trup: Vyššia hmotnosť, zložitý dizajn.

3.3. Zhrnutie

Navrhnutý HALE UAV s rozpätím 10 m, profilom S1223 (8°), V-tail a wingletmi (15°) je optimalizovaný pre stratosférické misie s nosnosťou 12 kg. Simulácie potvrdili vztlak 512,5 N, odpor 38,2 N a L/D 13,42, čo naznačuje dobrú efektivitu. Návrh zohľadňuje nízku hustotu vzduchu a nízke Re, minimalizuje aeroelastické riziká a je vhodný pre špecializované aplikácie, ako sú meteorologické merania alebo komunikácia. Budúce kroky by zahŕňali detailné modelovanie pohonu a vnútorných systémov.

4. Záver

Bakalárska práca sa zamerala na pokročilú aerodynamiku výškových bezpilotných lietajúcich systémov (HALE UAV) s cieľom analyzovať podmienky stratosférického letu, zmapovať súčasné technológie a navrhnuť teoretický koncept vonkajšieho aerodynamického tvaru HALE UAV s overením jeho výkonu pomocou simulácií.

Práca zahŕňala podrobnú rešerš existujúcich HALE UAV, ako sú Airbus Zephyr či BAE Systems PHASA-35, a analýzu stratosférického prostredia. Identifikovala kľúčové

aerodynamické výzvy, vrátane nízkych Reynoldsových čísel, potreby dostatočného vztlaku, efektov stlačiteľnosti a zníženej účinnosti riadiacich plôch v dôsledku nízkej hustoty vzduchu.

Na základe týchto poznatkov bol v CAD softvéri Autodesk Inventor navrhnutý model HALE UAV s rozpätím krídel 10 m, využívajúci profil S1223 a V-tail chvostové plochy. CFD simulácia v ANSYS Fluent pri podmienkach letu vo výške 20 km a rýchlosti 25 m/s potvrdila aerodynamický potenciál:

- Vztlak: 512,5 N, dostatočný na hmotnosť ~40 kg a nosnosť 10–12 kg.
- Odpor: 38,2 N.
- Pomer vztlaku k odporu (L/D): 13,42, čo naznačuje solídnu efektivitu, hoci zaostáva za špičkovými systémami (napr. Zephyr, L/D > 20).

Ciele práce boli splnené: analyzované boli špecifiká stratosférického letu, navrhnutý a simulačne overený aerodynamický koncept. Práca zdôraznila komplexnosť návrhu HALE UAV a dôležitosť zohľadnenia špecifických aerodynamických javov, ako sú laminárne separačné bubliny. Demonštrovala aj využitie moderných simulačných nástrojov na hodnotenie výkonu.

HALE UAV majú potenciál transformovať oblasti ako prieskum, komunikácia či monitorovanie. Prekonanie technologických výziev si vyžspoločenstvo vyžaduje interdisciplinárny prístup, vrátane detailného návrhu konštrukcie, pohonu a riadiacich systémov, ktoré neboli predmetom tejto práce. Táto práca prispela k pochopeniu aerodynamiky HALE UAV a poskytla základ pre budúci vývoj, ktorý by mal zahŕňať pokročilé simulácie, experimentálne testovanie a integráciu viacerých inžinierskych disciplín.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu APVV-22-0562 s názvom "Posilnenie odolnosti kľúčových prvkov infraštruktúry využitím pokrokov v 3D modelovaní (REMAKE-3D)".

Referencie

- [1] „ScienceDirect,“ 8 December 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S2564493924000262>.
- [2] D. T. E. N. a. kol., Technical Findings, Lessons Learned, and Recommendations Resulting, 2007.
- [3] A. N. Staff, „NASA,“ 28 Jún 2017. [Online]. Available: <https://appel.nasa.gov/2017/06/28/this-month-in-nasa-history-helios-flew-for-a-final-time/>.
- [4] F. L. L. Weaver, „The Royal Air Force,“ [Online]. Available: <https://raf.mod.uk/what-we-do/centre-for-air-and-space-power-studies/aspr/aspr-vol22-iss2-5-pdf/>. [Cit. Marec 2025].

- [5] O. Almeida a R. d. R. Dias, „Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas,” 14 December 2024. [Online]. Available: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/download/51520/51518?inline=1>.
- [6] K. Quach, 23 August 2022. [Online]. Available: https://www.theregister.com/2022/08/23/zephyr_drone_reco rd/.
- [7] Prismatic, „Prismatic,” [Online]. Available: <https://www.prismaticltd.co.uk/phasa-35/>.
- [8] „Optics,” 19 Február 2020. [Online]. Available: <https://optics.org/news/11/1/75>.
- [9] M. Bloch, „SolarQuotes,” 19 Február 2020. [Online]. Available: <https://www.solarquotes.com.au/blog/solar-phasa-35-trials-mb1413/>.
- [10] „BEA SYSTEMS,” 17 Február 2020. [Online]. Available: <https://www.baesystems.com/en/article/ground-breaking-solar-powered-unmanned-aircraft-makes-first-flight>.
- [11] C. Hoyle, „FlightGlobal,” 18 Júl 2023. [Online]. Available: <https://www.flightglobal.com/defence/baes-phasa-35-programme-on-a-high-after-stratospheric-test-debut/154153.article>.
- [12] G. Jennings, „JANES,” 28 Jún 2024. [Online]. Available: <https://www.janes.com/osint-insights/defence-news/air/bae-systems-preparing-further-phasa-35-haps-development-aircraft-for-2025-first-flight>.
- [13] B. Read, „Royal Aeronautical Society,” 8 Jún 2018. [Online]. Available: <https://www.aerosociety.com/news/phasa-set-to-sun/>.
- [14] C. Hoyle, „FlightGlobal,” 19 December 2024. [Online]. Available: <https://www.flightglobal.com/defence/bae-details-latest-test-success-with-high-flying-phasa-35/161180.article>.
- [15] AeroVironment, „AeroVironment,” 1 Október 2024. [Online]. Available: <https://www.avinc.com/resources/press-releases/view/av-successfully-flight-tests-new-solar-powered-aircraft-redefines-stratospheric-payload-capabilities>.
- [16] Z. LEI, „China Daily,” 4 September 2022. [Online]. Available: <https://www.chinadaily.com.cn/a/202209/04/WS6314458ca310fd2b29e75cd0.html>.
- [17] L. Xin, „South China Morning Post,” 5 September 2022. [Online]. Available: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3191396/chinas-biggest-solar-powered-drone-completes-first-test-flight>.
- [18] L. X. a. L. Yang, „Global Times,” 4 September 2022. [Online]. Available: <https://www.globaltimes.cn/page/202209/1274541.shtml>.
- [19] A. Tailby, „Airbus,” 14 September 2018. [Online]. Available: <https://www.icao.int/Meetings/DRONEENABLE2/Documents/Presentations/2-5-2%20Tailby.pdf>.
- [20] National Oceanic and Atmospheric Administration, „National Oceanic and Atmospheric Administration,” 20 August 2024. [Online]. Available: <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere>.
- [21] University Corporation for Atmospheric Research, „University Corporation for Atmospheric Research,” [Online]. Available: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/stratosphere>. [Cit. Január 2025].
- [22] SKYbrary, „SKYbrary,” [Online]. Available: <https://skybrary.aero/articles/atmosphere>. [Cit. Január 2025].
- [23] E. Brotak, „Flight Safety Foundation,” 1 November 2013. [Online]. Available: <https://flightsafety.org/asw-article/into-thin-air/>.
- [24] M. Cavcar, [Online]. Available: <http://fisicaatmo.at.fcen.uba.ar/practicas/ISAweb.pdf>. [Cit. Marec 2025].
- [25] Xray, „Xray,” 15 Apríl 2025. [Online]. Available: <https://xray.greyb.com/drones/flying-drones-at-high-altitude>.
- [26] T. McDonnell, J. Mehr a A. Ning, „Multidisciplinary Design Optimization of Flexible SolarRegener Regenerative High-Altitude Long-Endur e High-Altitude Long-Endurance Air ance Aircraft,” Január, 2018.
- [27] SoftBank Corp., „The Research Institute of Advanced Technology,” 16 Október 2023. [Online]. Available: <https://www.softbank.jp/en/corp/technology/research/story-event/026/>.
- [28] International Civil Aviation Organization, Manual of the ICAO Standard Atmosphere: Extended to 80 Kilometres (262 500 Feet), International Civil Aviation Organization, 1993.
- [29] National Aeronautics and Space Administration, „National Aeronautics and Space Administration,” [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/reynolds.html>. [Cit. Marec 2025].
- [30] J. G. Leishman, Introduction to Aerospace Flight Vehicles, Daytona Beach, Florida: Embry-Riddle Aeronautical University, 2023.
- [31] T. Xia, H. Dong, L. Yang, S. Liu a Z. Jin, Investigation on flow structure and aerodynamic characteristics over an airfoil at low Reynolds number—A review, 2021.
- [32] H. O. B. G. a. I. C. Justin Winslow, „Basic Understanding of Airfoil Characteristics at Low Reynolds Numbers (104–105),” Journal of Aircraft, 15 December 2017.
- [33] M. S. Selig, Low Reynolds Number Airfoil Design, 2003.
- [34] D. M. L. Z. X. Y. a. Y. Yuan Yao, Aerodynamic Optimization and Analysis of Low Reynolds Number Propeller with Gurney Flap for Ultra-High-Altitude Unmanned Aerial Vehicle, 2022.
- [35] J. Li, M. Zhang, J. C. M. Tay a N. Liu, Low-Reynolds-number airfoil design optimization using deep-learning-based tailored airfoil modes, 2022.
- [36] T. J. Mueller, „AEROSPACE RESEARCH CENTRAL,” 22 Máj 22 May 2012. [Online]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.45199>.

- [37] E. Brotak, „Flight Safety Foundation,“ 1 November 2013. [Online]. Available: <https://flightsafety.org/asw-article/into-thin-air/>.
- [38] Xray, „Xray,“ 15 April 2025. [Online]. Available: <https://xray.greyb.com/drones/flying-drones-at-high-altitude>.
- [39] J. J. a. S. Smith, Design of HALE Aircraft Using Inflatable Wings, 2012.
- [40] A. A. a. T. Rahulan, A Mathematical Model of a Conceptual Design Approach of High Altitude Solar Powered Unmanned Aerial Vehicles, 2017.
- [41] P. Kämpf, „Stack Exchange,“ April 2016. [Online]. Available: <https://aviation.stackexchange.com/questions/27219/will-control-surfaces-on-a-plane-be-less-efficient-at-a-higher-altitude>.
- [42] AIRBUS, „AIRBUS,“ [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/zephyr>.
- [43] AALTO, „AALTO,“ [Online]. Available: <https://www.aaltohaps.com>.
- [44] M. Ball, „Unmanned Systems Technology,“ 27 December 2024. [Online]. Available: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2024/12/baes-phas-a-35-haps-platform-completes-new-stratospheric-flight-tests/>.
- [45] N. L. D. F. J. Everaerts, PEGASUS: DESIGN OF A STRATOSPHERIC LONG ENDURANCE UAV SYSTEM FOR.



PRÁVA CESTUJÚCICH SO ŠPECIFICKÝMI POTREBAMI

Kristína Berčíková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Alena Novák Sedláčková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This paper is focused on the rights of passengers with specific needs in air transport. The paper analyzes the legislative framework for the protection of these types of passengers and identifies the main challenges in the implementation process. There are described international and European regulations, with particular attention given to the rights of people with disabilities and people with reduced mobility and practice procedures at the M. R. Štefánik Airport in Bratislava and other selected airports. As a result of the research were identified the deficiencies in infrastructure, assistance services, and passenger awareness at M. R. Štefánik Airport in Bratislava and the proposal for improvements in accessibility and the quality of services for this group of passengers was prepared. The results of the analysis highlight the need for modernization of the existing system and the implementation of new proposals to enhance and ensure the safety of travel for all passengers.

Keywords

passenger rights, people with specific needs, reduced mobility, unaccompanied minors, proposal for improving services

1. Úvod

Letecká doprava patrí medzi najrýchlejšie a najefektívnejšie spôsoby prepravy osôb na veľké vzdialenosti, pričom zohráva významnú úlohu v globalizovanom svete. Pre mnohých cestujúcich predstavuje neoddeliteľnú súčasť ich pracovného či súkromného života, avšak pre osoby so špecifickými potrebami môže byť proces cestovania značne komplikovanejší. Cestujúci so zdravotným postihnutím, zníženou pohyblivosťou alebo inými špecifickými potrebami často čelia rôznym prekážkam, ktoré im bránia v rovnocennom prístupe k službám leteckej dopravy.

Práva cestujúcich so špecifickými potrebami sú upravené viacerými medzinárodnými a európskymi právnymi normami, ktoré stanovujú povinnosti leteckých spoločností a letísk pri poskytovaní primeranej asistencie. Napriek tomu sa v praxi neustále stretávame s problémami pri implementácii týchto opatrení. Cestujúci narážajú na nedostatočne prispôsobenú infraštruktúru, chýbajúce alebo nedostatočné asistenčné služby, slabú informovanosť či obmedzené možnosti pri rezervácii leteniek a asistencie. Tieto faktory môžu spôsobiť výrazné komplikácie a v mnohých prípadoch aj obmedzenie možnosti cestovania.

Hlavným cieľom tohto článku je podrobne analyzovať práva cestujúcich so špecifickými potrebami v kontexte leteckej dopravy, so zameraním na ich právnu ochranu, dostupnosť služieb a problémy spojené s ich uplatňovaním. Článok sa opiera o analýzu právnych predpisov Európskej únie, predovšetkým Nariadenia Európskeho parlamentu a Rady (ES) č. 261/2004, ktoré sa zaoberá stanovením spoločných pravidiel systému náhrad a pomoci cestujúcim pri odmietnutí nástupu do lietadla, zrušení alebo veľkom meškaní letov a Nariadenia Európskeho parlamentu a Rady (ES) č. 1107/2006 z 5. júla 2006 o právach zdravotne postihnutých osôb a osôb so zníženou pohyblivosťou v leteckej doprave, ako aj právnych noriem platných v Slovenskej republike. Osobitná pozornosť je venovaná podmienkam a opatreniam implementovaným na Letisku M. R.

Štefánika v Bratislave, ktoré slúži ako hlavné medzinárodné letisko na Slovensku.

Článok sa zameriava nielen na teoretickú analýzu platnej legislatívy, ale aj na identifikáciu praktických problémov, s ktorými sa cestujúci stretávajú. Dôležitou súčasťou je posúdenie úrovne poskytovaných služieb na letisku, hodnotenie dostupnosti informácií a návrh opatrení na zlepšenie situácie. Výsledkom je súbor odporúčaní, ktoré by mohli prispieť k zvýšeniu úrovne poskytovaných služieb a k posilneniu ochrany práv cestujúcich so špecifickými potrebami.

Téma práv cestujúcich v leteckej doprave je dôležitá nielen z pohľadu právnej regulácie, ale aj z hľadiska rovnakých príležitostí pre všetkých cestujúcich. Letecké spoločnosti a letiská by mali vnímať poskytovanie asistenčných služieb nielen ako právnu povinnosť, ale aj ako etický záväzok voči svojim zákazníkom. Zabezpečenie plnej prístupnosti a rovnakého zaobchádzania so všetkými cestujúcimi je nevyhnutné pre ďalší rozvoj leteckej dopravy a jej udržateľnosť v budúcnosti.

2. Právny rámec ochrany práv cestujúcich

Zabezpečenie práv cestujúcich so špecifickými potrebami v leteckej doprave si vyžaduje jasne definovaný a uplatňovaný právny rámec. Vzhľadom na celosvetový charakter letectva sa na ich ochrane podieľajú nielen národné, ale aj medzinárodné a európske právne normy. Tieto predpisy stanovujú povinnosti leteckých dopravcov a letísk, určujú pravidlá pre kompenzácie, poskytovanie asistencie a zakazujú akúkoľvek formu diskriminácie. V tejto kapitole sú rozobraté hlavné dokumenty, ktoré tvoria právny základ ochrany týchto cestujúcich, ako aj praktické dôsledky ich implementácie [1].

2.1 Medzinárodné dohody a ich význam

Medzinárodné letecké právo sa formovalo od začiatku 20. storočia, pričom zásadné postavenie získal Dohovor

o zodpovednosti v leteckej preprave (Varšavský dohovor) z roku 1929, ktorý upravoval zodpovednosť dopravcov za škodu spôsobenú počas leteckej prepravy. Neskôr bol tento dokument doplnený a nahradený Dohovorom o zjednotení niektorých pravidiel pre medzinárodnú leteckú dopravu (Montrealský dohovor) z roku 1999, ktorý zaviedol jednotné pravidlá pre kompenzácie, zodpovednosť za meškania a straty batožiny, čím zohľadnil potrebu moderného právneho rámca pre rastúci trh leteckej dopravy [2,3,4].

2.2 Legislatíva Európskej únie

V rámci Európskej únie sú kľúčovými dokumentmi nariadenie (ES) č. 261/2004 a nariadenie (ES) č. 1107/2006. Prvé upravuje nároky cestujúcich pri zrušení, oneskorení letov alebo pri odmietnutí nástupu do lietadla. Zavádza právo na kompenzáciu vo výške 250 až 600 eur v závislosti od dĺžky letu.

Praktické uplatňovanie tohto nariadenia bolo potvrdené viacerými rozhodnutiami Európskeho súdneho dvora ako napríklad v prípade *Sturgeon v. Condor Flugdienst GmbH* sa potvrdilo, že cestujúci majú nárok na finančnú kompenzáciu aj pri dlhších meškaniach letu presahujúcich tri hodiny, čo posilnilo ochranu ich práv. Pre objasnenie, v tomto prípade išlo o rodinu *Sturgeon*, ktorá mala naplánovaný let z Toronta do Frankfurtu, avšak po odbavení boli informovaní, že ich let bol zrušený. Následne im bola poskytnutá náhradná preprava, ktorá dorazila do cieľovej destinácie až o 25 hodín neskôr. Viacero podobných prípadov viedlo k záveru, že Súdny dvor rozhodol o nároku cestujúcich na náhradu aj v prípade dlhých meškaní letov, čím zabezpečil vyššiu úroveň ochrany cestujúcich v leteckej doprave [5].

Druhé nariadenie špecificky upravuje podmienky pre osoby so zdravotným postihnutím a so zníženou pohyblivosťou. Zaväzuje letiská a letecké spoločnosti poskytovať asistenciu bez dodatočných nákladov, zabezpečiť prístupnú infraštruktúru a adekvátne vyškolenie personálu.

V praxi však dochádza k situáciám, kedy niektoré letecké spoločnosti nespĺnia svoje povinnosti. Napríklad v roku 2018 bola zaznamenaná kauza, keď britská letecká spoločnosť odmietla pomoc cestujúcej s mozgovou obrnou, pretože „vraj vyzerá úplne normálne“. Ďalším prípadom bol 56 ročný pán, ktorý musel čakať v lietadle takmer dve hodiny z dôvodu straty jeho invalidného vozíka. Spomínané, ale aj ďalšie prípady vyvolali diskusiu o nutnosti lepšej implementácie pravidiel [6,7,8].

2.3 Povinnosti dopravcov a letísk

Letecké spoločnosti musia umožniť rezerváciu letov osobám so zníženou pohyblivosťou bez diskriminácie. Letiská musia mať vyhradený personál a technické vybavenie (napr. zdvíhacie plošiny, vozíky, pomocné vozidlá). Povinnosťou letiska je aj zabezpečiť bezbariérový prístup k odbavovacím priestorom, miestam prispôbeným na čakanie a hygienickým zariadeniam, vrátane značenia a navigácie vhodnej pre osoby so zrakovým alebo sluchovým postihnutím.

3. Medzinárodné organizácie zamerané na riešenie práv cestujúcich

Ochrana práv cestujúcich v medzinárodnej leteckej doprave sa zaoberá zabezpečením spravodlivých a bezpečných podmienok na cestovanie. Neustále sa navyšujúci záujem o leteckú dopravu ovplyvňuje úlohu medzinárodných organizácií. Medzinárodné organizácie sú časťou medzinárodného práva s odvodenou a presne vymedzenou právnou subjektivitou. Vo všeobecnom ponímaní zahŕňajú rôzne druhy inštitúcií a orgánov, avšak najčastejšie sa pod týmto pojmom rozumejú medzinárodné vládne organizácie. Okrem nich však existujú aj nevládne organizácie, ktoré sa taktiež podieľajú na ochrane práv cestujúcich.

Potreba spolupráce medzi štátmi, vládnyimi a nevládnymi organizáciami a leteckými spoločnosťami v odvetví leteckej dopravy je veľmi dôležitá pre zabezpečenie a posilnenie práv cestujúcich. Medzinárodná spolupráca napomáha v riešení problémov týkajúcich sa cestovania a zaisťuje, že požiadavky cestujúcich sú prediskutované a ich práva sú chránené. Je potrebné, aby boli práva cestujúcich kvôli cestovaniu medzi rôznymi krajinami chránené na medzinárodnej úrovni. Vládne a medzinárodné organizácie plnia dôležitú úlohu pri tvorbe a uplatňovaní právnych predpisov na ochranu cestujúcich. K najvýznamnejším inštitúciám v tejto oblasti patria Medzinárodná organizácia pre civilné letectvo (ICAO), Medzinárodná asociácia leteckých dopravcov (IATA) a Agentúra Európskej únie pre bezpečnosť civilného letectva (EASA) [9].

Medzinárodná organizácia pre civilné letectvo (ICAO)

Medzinárodná organizácia pre civilné letectvo, ďalej len „ICAO“, patrí medzi najreprezentatívnejšie vládne organizácie so statusom odborných organizácií patriacich k Organizácii Spojených národov.

Zohráva dôležitú úlohu pri určovaní medzinárodných štandardov a predpisov bezpečnosti, ochrany a efektívnosti civilného letectva. Keď ide o práva cestujúcich, ICAO sprostredkúva usmernenia, ktoré sa využívajú ako základ regionálnych a národných predpisov. Cieľom organizácie ICAO je podporovať rozvoj zásad a technológií medzinárodného lietania a zároveň podporovať plánovanie a rozvoj medzinárodnej leteckej dopravy [10].

3.1. Agentúra Európskej únie pre bezpečnosť civilného letectva (EASA)

Agentúra Európskej únie pre bezpečnosť civilného letectva (EASA) je skutočným európskym leteckým úradom pre civilné letectvo a zároveň kľúčovou inštitúciou Európskej únie, ktorá zabezpečuje vysokú úroveň bezpečnosti v civilnom letectve. Bola zriadená Nariadením Európskeho parlamentu a Rady č. 1592/02 a zahájila svoju činnosť 27.09.2003. Táto vládna organizácia poskytuje jednotné normy a predpisy pre všetky členské štáty EÚ, čím napomáha k harmonizácii a zlepšeniu leteckej bezpečnosti na európskej úrovni. Bezpečnosť je súčasťou noriem, ktoré musia jednotlivé letecké spoločnosti dodržiavať, čo je základným právom každého cestujúceho. EASA plní rôznorodé funkcie zamerané na zabezpečenie bezpečnosti

a efektívnosti civilného letectva v Európe, čím prispieva k ochrane práv cestujúcich. EASA stanovuje bezpečnostné normy pre letecké spoločnosti, výrobcov lietadiel a letiská, pomocou ktorých zaisťuje bezpečné cestovanie [11].

3.2. Medzinárodná asociácia leteckých dopravcov (IATA)

Hlavnou úlohou Medzinárodnej asociácie leteckých dopravcov (IATA) je pomáhať rozvoju civilnej leteckej dopravy, angažovať sa v leteckej komerčnej doprave, zriaďovať rozvoj kooperácie medzi podnikmi leteckej dopravy, ktoré sa stretávajú na medzinárodnej leteckej doprave a v neposlednom rade spolupracovať s ďalšími medzinárodnými organizáciami vrátane ICAO. IATA taktiež sprostredkúva informácie medzi cestujúcimi a leteckými spoločnosťami. Podporuje bezpečné, dôveryhodné, racionálne a efektívne letecké služby. IATA nevydáva právne záväzné predpisy, ale modeluje a pozmeňuje štandardizované pravidlá, ktoré sú uplatňované v globálnej leteckej doprave. Ďalej sa zameriava na oblasti medzinárodných dohôd o sadzbách pri poskytovaní odplaty cestujúcim leteckej dopravy, čím prispieva ku stanovovaniu štandardov ovplyvňujúcich práva cestujúcich [12,13,14].

4. Rozlišovanie rôznych typov cestujúcich v leteckej doprave

Rozlišovanie rôznych typov cestujúcich v leteckej doprave je nevyhnutným bodom pri zaobchádzaní s cestujúcimi a s ich následným odbavením z dôvodu rozdielnej cenovej politiky a osobitných prístupov. Predstavuje dôležitý prvok efektívneho riadenia leteckých spoločností a letísk. Z hľadiska poskytovania služieb, dodržiavania ich práv a garancie bezpečnosti je potrebné rozlišovať cestujúcich spravodlivo, s ohľadom na ich zdravotný stav. V rámci Európskej únie existuje mnoho pravidiel pre osoby so zdravotným postihnutím a zníženou pohyblivosťou, osobitnú kategóriu tvoria deti cestujúce bez sprievodu (Unaccompanied minors - UM), tehotné ženy a podobne. „Letecký cestujúci je osoba, ktorá je ako cestujúci uvedená na cestovnom doklade, a ktorá ho predloží pri check-in pulte, kiosku, alebo na on-line check-ine a preukáže sa platným identifikačným dokladom“ [15].

Cestujúci v leteckej doprave aj napriek viacerým skupinám podľa zdravotného stavu a ďalších delení majú nárok a právo na starostlivosť a zabezpečenie požadovanej služby zo strany leteckého dopravcu.

Na základe uvedených informácií je dôležité pozrieť sa aj na to, ako sú tieto princípy uplatňované v praxi. Nasledujúca kapitola sa preto venuje konkrétnemu príkladu Letiska M. R. Štefánika v Bratislave, kde bola analyzovaná úroveň poskytovaných služieb pre cestujúcich so špecifickými potrebami, identifikované hlavné problémy a súvisiace opatrenia na ich zlepšenie.

5. Návrh na zlepšenie prístupu k cestujúcim so špecifickými potrebami na letisku M. R. Štefánika v Bratislave

5.1. Identifikované nedostatky na Letisku M. R. Štefánika

Systém letiska M. R. Štefánika má niekoľko nedostatkov, ktoré môžu ovplyvniť skúsenosť a spokojnosť cestujúcich. Jedným z nich je absencia dostupnosti zdvižnej plošiny pre nástup/výstup do/z lietadla alebo manipuláciu s cestujúcimi s pohybovým znevýhodnením, čo môže komplikovať ich nástup alebo výstup z lietadla. Tento problém môže viesť ku zdržaniu pri odbavení, nepríjemnému pocitu konkrétnych cestujúcich alebo zbytočnému stresu. Ďalším nedostatkom je nedostatočný počet personálu vyhradeného na asistenciu v najrušnejšom čase letiska, čo spôsobuje dlhšiu čakaciu dobu na asistenciu, následné zdržanie pri odbavení a nástupe na palubu a zároveň nespokojnosť cestujúcich. Niektorí cestujúci môžu mať problémy s orientáciou na letisku pre nejednoznačné značenie a obmedzené vizuálne či zvukové navigačné prvky. Aj napriek dostupnosti asistenčných služieb môžu mať cestujúci obavy zo zmeškania letu alebo prípadných komplikácií. Hoci letisko ponúka parkovacie miesta pre držiteľov preukazu ŤŽP (ťažko zdravotne postihnutých), ich počet je obmedzený a môže byť nepostačujúci v čase vyššej frekvencie odletov (počas letných mesiacov). V situáciách vyššej obsadenosti parkoviska to môže skomplikovať príchod a odchod cestujúcich so zdravotným znevýhodnením. Hlásenie asistencie vopred danej leteckej spoločnosti môže byť pre niektorých cestujúcich komplikované, nepraktické a neprehľadné a môže to znížovať celkovú spokojnosť a komfort cestujúcich pri využívaní služieb letiska.

5.2. Návrh technických opatrení

Jedným z hlavných už spomínaných problémov je obmedzená fyzická infraštruktúra pre cestujúcich so znevýhodnením. Pre riešenie tohto nedostatku je potrebné zahrnúť do využívania zdvižné plošiny a vybudovať bezbariérové prístupy k lietadlám. Modernizácia už existujúcich zariadení, ako sú rampy a výtahy by výrazne uľahčila pohyb cestujúcich s obmedzenou mobilitou. Aktuálne zdvižné plošiny na letisku nie sú dostupné, čo často spôsobuje zdržania pri nástupe a výstupe z lietadiel, nakoľko títo cestujúci musia byť doslova vynesení na palubu lietadla za pomoci asistenčných pracovníkov a pri vystupovaní naopak znesení a následne odprevadení až po vchod do terminálu.

Ďalším opatrením by bolo rozšírenie vyhradených priestorov na asistenciu týmto cestujúcim, čím by sa zabezpečila väčšia diskretnosť a pohodlie pri odbavení. Parkovanie pre držiteľov preukazu ŤŽP by malo byť rozšírené o ďalšie vyhradené miesta v blízkosti vchodov na letisko, pričom by bolo vhodné zlepšiť ich dostupnosť v čase zvýšenej vyťaženia parkoviska.

5.3. Návrh personálnych a informačných riešení

Na letisku M. R. Štefánika je potrebné zvýšiť počet asistenčného personálu, najmä počas dopravnej špičky (najvyťaženejšie obdobie z hľadiska využitia infraštruktúry a prostriedkov letiska), aby bolo možné minimalizovanie časov čakania. Kvalita asistenčných služieb by mohla byť zlepšená zavedením pravidelných školení zamestnancov, ktoré by zahŕňali nielen fyzickú pomoc, ale aj komunikáciu s cestujúcimi so špecifickými potrebami.

Pre rodičov nesprevádzaných detí by mohlo byť užitočné zaviesť digitálnu sledovaciu platformu, ktorá by im umožnila monitorovanie pohybu dieťaťa na letisku v reálnom čase. Automatizované odbavovacie kiosky prispôbené pre cestujúcich so zníženou mobilitou by mohli zrýchliť proces odbavenia a znížiť potrebu osobnej asistencie.

5.4. Odhad nákladov a realizácie opatrení

Navrhované opatrenia na zlepšenie služieb pre cestujúcich so znevýhodnením a nesprevádzané deti na letisku M. R. Štefánika sa zameriavajú na tri hlavné oblasti, ktorými sú zlepšenie fyzickej infraštruktúry, modernizácia asistenčných služieb a zvýšenie informovanosti cestujúcich. Opatrenia zahŕňajú konkrétne investície a organizačné zmeny, ktoré majú za cieľ zvýšiť komfort, dostupnosť a efektívnosť poskytovaných služieb. Na základe priemerných trhových cien pre potrebné zmeny infraštruktúry a iných technologických riešení sú odhadované sumy na realizáciu zmien fyzickej infraštruktúry definované v Tabuľke 2. Presnejšie sumy by sa mohli líšiť na základe výberu konkrétnych dodávateľov, stavebných firiem a technologických partnerov. Nakoľko nemáme prístup ku presným parametrom potrebným ku realizácii opatrení na vybranom letisku, ceny sú odhadované napríklad podľa orientačných cien za obstaranie zdvíhacích plošín, ktoré sa nachádzajú v rozmedzí 95 000 – 130 000 USD za kus. Letisko Sarajevo prešlo týmito zmenami v roku 2017 a zaplatili za jednu plošinu 301 000€ [16,17,18].

Tabuľka 2: Odhad nákladov potrebných na realizáciu opatrení

Opatrenie	Odhadované náklady [€]	Realizácia (mesiace)
Zdvíhacie plošiny a bezbariérové prístupy	250 000 – 400 000	6 – 18
Modernizácia výťahov a rámp	100 000 – 200 000	6 – 12
Rozšírenie priestorov na asistenciu	80 000 – 120 000	6 – 12
Zvýšenie kapacity parkovacích miest pre ŤZP	50 000 – 100 000	3 – 6

Zdroj: vlastné spracovanie podľa dostupných zdrojov [16,17,18].

5.5. Prínosy implementácie opatrení

Zavedenie opatrení by malo priniesť viaceré pozitívne zmeny, ktoré by zlepšili celkovú skúsenosť cestujúcich so znevýhodnením a detí cestujúcich bez sprievodu. Zvýšená dostupnosť fyzickej infraštruktúry by umožnila rýchlejší a pohodlnejší presun po letisku, čím by sa eliminovali zdržania a nepríjemnosti pri nástupe a výstupe z lietadiel. Modernizácia asistenčných služieb by zabezpečila efektívnejšiu podporu pre cestujúcich so špecifickými potrebami, znížila by stres spojený s cestovaním a prispela by k väčšej celkovej spokojnosti zákazníkov.

Lepšia informovanosť prostredníctvom mobilnej aplikácie, digitálnych tabúľ a sociálnych médií by umožnila cestujúcim lepšie sa pripraviť na cestu, čím by sa predišlo nejasnostiam a zbytočným komplikáciám. Zlepšenie komunikačných kanálov by taktiež posilnilo dôveru cestujúcich v letiskové služby a zvýšilo ich ochotu využívať toto letisko pri budúcich letoch.

6. Výsledky

Výskum realizovaný v rámci článku sa zameriava na posúdenie aktuálneho stavu poskytovania služieb pre cestujúcich so špecifickými potrebami v leteckej doprave, so zameraním na Letisko M. R. Štefánika v Bratislave. Na základe hodnotenia legislatívneho rámca, existujúcich noriem a praktického fungovania asistenčných služieb boli identifikované viaceré kľúčové nedostatky, ktoré majú priamy vplyv na komfort, bezpečnosť a rovnaký prístup tejto skupiny cestujúcich.

Z pohľadu fyzickej infraštruktúry, ktorá sa javí ako problematická, a to najmä nedostatočne označené miesta určené pre osoby so zníženou pohyblivosťou, chýbajúce prvky vedenia pre nevidiacich a slabozrakých, ako aj absencia vyhradených zón pre tieto skupiny cestujúcich. Navigačný systém v priestoroch letiska je zastaraný a neprehľadný, čo spôsobuje problémy najmä osôb s obmedzenou schopnosťou orientácie. Tieto faktory poskytujú úroveň samostatnosti cestujúcich a zvyšujú však závislosť na letiskovom personáli, ktorý v mnohých prípadoch nie je postačujúci na špecifickú komunikáciu s osobami so zdravotným postihnutím.

Z pohľadu asistenčných služieb boli zistené viaceré medzery v oblasti objednávaní a poskytovania pomoci. Rezervačný systém na stránke letiska neponúka dostatočne intuitívne a prehľadné rozhranie, najmä pre starších ľudí a osoby s mentálnym postihnutím. Taktiež absentuje viacjazyčné spracovanie informácií, vrátane verzií v jednoduchom jazyku alebo formou video/audio návodu. Cestujúci nie sú dostatočne informovaní o svojich nárokoch na asistenciu a často ani nevedia, že majú právo na bezplatnú pomoc pri pohybe po letisku, nástupe do lietadla alebo manipulácii s batožinou.

Prieskum dokumentov a porovnanie s odporúčaniami Európskej únie, ako aj usmerneniami medzinárodných organizácií (ICAO, EASA, IATA) ukázal, že letisko síce spĺňa základné požiadavky

nariadenia (ES) č. 1107/2006, avšak implementácia v praxi je často nepostačujúca na zabezpečenie služieb vysokej kvality.

Na základe týchto poznatkov boli navrhnuté opatrenia zamerané na tri hlavné oblasti: zlepšenie infraštruktúry (napr. zdvižné plošiny, bezbariérové prístupy), zlepšenie kvality a dostupnosti asistenčných služieb (napr. školenie zamestnancov, modernizácia rezervačného informačného systému) a zintenzívnenie kampaní pre cestujúcich (napr. mobilná aplikácia). Tieto návrhy sú konkrétne, realizovateľné a reflektujúce potrebu lepšieho prístupu v civilnom letectve.

7. Záver

Na základe analýzy právnych predpisov a skúseností cestujúcich možno konštatovať, že ochrana práv osôb so špecifickými potrebami v leteckej doprave je stále neuspokojivá a vyžaduje ďalšie zlepšenia. Hoci právny rámec existuje a je pomerne podrobný, v praxi dochádza k viacerým problémom, ktoré bránia jeho efektívnemu uplatňovaniu.

Jedným z hlavných problémov je nedostatočne vybudovaná infraštruktúra na letisku M. R. Štefánika v Bratislave, kde chýbajú potrebné bezbariérové prvky alebo sú asistenčné služby nedostatočne rozvinuté. Ďalším problémom je slabá informovanosť cestujúcich o ich právach a možnostiach využitia pomoci. Okrem toho existujú rozdiely v úrovni poskytovaných služieb medzi jednotlivými leteckými spoločnosťami a letiskami, čo môže viesť k rozdielnemu zaobchádzaniu s cestujúcimi so špecifickými potrebami.

Okrem Letiska M. R. Štefánika v Bratislave, ktoré bolo v práci podrobnejšie analyzované, zohráva významnú úlohu aj Letisko Košice ako druhé najvyťaženejšie letisko na Slovensku. Skúsenosti cestujúcich so špecifickými potrebami sú v niektorých prípadoch negatívne z dôvodu nedostatkov, ktoré výrazne ovplyvňujú komfort a bezpečnosť cestovania osôb so zníženou pohyblivosťou, najmä imobilných cestujúcich.

V práci uvádzame skúsenosť cestujúcej na invalidnom vozíku, ktorá vyjadrila nespokojnosť s absenciou zdvihacej plošiny (tzv. ambuliftom), ktorá je nevyhnutná na bezpečný a dôstojný nástup do lietadla. V súčasnosti je asistencia riešená provizórne, čo často vedie k nepríjemnému a ponižujúcemu spôsobu manipulácie s pasažiermi. Navyše, absencia špecializovaného a profesionálneho technického vybavenia na manipuláciu s imobilnými osobami zvyšuje riziko zranenia ako cestujúceho, tak aj personálu. Tieto nedostatky poukazujú na potrebu výraznej modernizácie technickej infraštruktúry a zavedenie štandardov, ktoré by boli v súlade s európskou legislatívou o právach osôb so zníženou pohyblivosťou.

Pre zabezpečenie skutočnej rovnosti ponúkaných služieb pre všetkých cestujúcich, je potrebné posilniť implementáciu legislatívnych opatrení a vytvoriť jednotné štandardy pre všetky letiská. V rámci článku boli identifikované konkrétne riešenia, ako je modernizácia konkrétneho letiska, lepšie školenie zamestnancov, rozšírenie potrebných informácií a posilnenie právnej ochrany cestujúcich.

Článok poukazuje na význam kontinuálneho zlepšovania podmienok pre cestujúcich so špecifickými potrebami a zdôrazňuje, že spravodlivá doprava by mala byť prioritou pre všetky letecké spoločnosti a letiská. Implementácia odporúčaní uvedených v tomto článku by mohla viesť k výraznému zlepšeniu podmienok pre cestujúcich z letiska M. R. Štefánika a k zvýšeniu celkovej úrovne komfortu a dostupnosti leteckej dopravy.

Referencie

- [1] Sedláčková, Alena Novák. Letecké právo. 2023.
- [2] SLOV-LEX. [Online] 1968. https://static.slov-lex.sk/pdf/SK/ZZ/1968/27/ZZ_1968_27_19680305.pdf.
- [3] —. [Online] 17. 12. 2003. https://static.slov-lex.sk/pdf/SK/ZZ/2003/544/ZZ_2003_544_20031217.pdf.
- [4] SLOV-LEX. [Online] 5. 4. 2001. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001D0539>.
- [5] SOI. [Online] <https://www.soi.sk/sk/prava-cestujucich/prava-cestujucich-v-leteckej-doprave.soi>.
- [6] [Online] ALD Editors, 19. 11. 2009. <https://airlawdigest.com/case/c-402-07-sturgeon-others-v-condor-flugdienst-gmbh-c-432-07-bock-and-lepuschitz-v-air-france-sa-2009/>.
- [7] [Online] 29. 3. 2018. <https://www.hlavnespravy.sk/nechali-ma-palube-easyjet-40-minut-ochrnutu-televiznu-moderatorku-zabudli-lietadle/1357112>.
- [8] EUR-LEX. [Online] 26. 7. 2006. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1107>.
- [9] EASA. [Online] <https://www.easa.europa.eu/sk/light/topics/cooperation-international-civil-aviation-organization-icao>.
- [10] Ministerstvo zahraničných vecí. [Online] <https://www.mzv.sk/en/diplomacy/slovakia-in-un/specialized-and-professional-organizations>.
- [11] EASA. [Online] <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/international-cooperation>.
- [12] Eduaviation. [Online] <https://eduaviation.lf.tuke.sk/wp-content/uploads/Letecke-pravo-kap-3.pdf>.
- [13] Super letuška. [Online] <https://superletuska.sk/prepravne-podmienky>.
- [14] IATA. [Online] <https://www.iata.org/>.
- [15] Ján Kolesár, Peter Hanák a Vladimír Socha. Letecká preprava osôb a batožín. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2020. ISBN 978-80-01-06629_4.
- [16] Zmluva o poskytovaní služieb. [Online] https://www.zmluvy.gov.sk/data/att/123845_dokument.pdf.

- [17] Flying Bosnian. [Online] 10. 2 2017.
<https://flyingbosnian.blogspot.com/2017/02/sarajevo-airport-purchased-special.html?> .
- [18] Made-in-China. [Online] 18. 3 2025.
<https://dimaindustry.en.made-in-china.com/product/HwyAZvGUXQVa/China-Airport-Ambulift.html?>.



IDENTIFIKACE FAKTORŮ KONKURENCESCHOPNOSTI LETIŠTĚ BRNO - TUŘANY

Chiara Botterová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Anna Tomová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This paper focuses on the evaluation of regional airport competitiveness within the liberalized framework of the European air transport market. The main objective is to identify and assess the key factors determining the competitive position of Brno–Tuřany Airport, using a comparative analysis with Leoš Janáček Airport Ostrava. Drawing on a comprehensive literature review, nine relevant indicators were selected and quantified through a tailored competitiveness index, applied in both weighted and unweighted forms. The methodological framework enables a structured comparison of airport performance, accounting for both operational and infrastructural dimensions. The analysis reveals that Brno–Tuřany Airport demonstrates a higher level of competitiveness, particularly in terms of passenger traffic, destination network, terminal capacity, and engagement with charter carriers. In contrast, Ostrava Airport shows relative strengths in air cargo throughput and multimodal accessibility via rail transport. The results confirm the applicability of index-based approaches in capturing the multifaceted nature of airport competitiveness and offer a valuable tool for strategic planning and performance evaluation. Furthermore, the findings emphasize the dynamic character of airport markets and the importance of continuous investment and adaptability in infrastructure, connectivity, and service quality.

Keywords

airport competitiveness, regional airports, Brno–Tuřany Airport, Ostrava Airport, competitiveness index, strategic development

1. Úvod

Konkurenceschopnost regionálních letišť je v současnosti zásadním tématem nejen v oblasti letecké dopravy, ale i v kontextu širšího regionálního rozvoje, zaměstnanosti a cestovního ruchu. V éře globalizace, technického pokroku a liberalizace leteckého trhu se i menší regionální letiště dostávají do přímé konkurence, a to nejen v rámci jedné země, ale často i napříč státními hranicemi. Zatímco v minulosti byla letiště chápána primárně jako dopravní infrastruktura, dnes jsou vnímána jako dynamická a multifunkční centra s významným dopadem na regionální ekonomiku [1][2][3].

Letiště Brno–Tuřany a letiště Leoše Janáčka Ostrava představují typická regionální letiště středoevropského prostoru. Jejich srovnání umožňuje identifikovat rozdíly ve strategii řízení, infrastruktuře a schopnosti reagovat na tržní podmínky. Článek reaguje na potřebu systematického hodnocení konkurenceschopnosti regionálních letišť a přispívá k lepšímu pochopení toho, jaké faktory vedou k úspěchu v podmínkách rostoucí konkurence, omezených rozpočtů a vysokých nároků cestujících i dopravců.

Výzkum má za cíl nejen akademický přínos, ale také praktické využití – pomáhá identifikovat silné a slabé stránky letišť, což může být vodítkem pro budoucí rozhodování managementu, regionálních samospráv či investorů. Závěry článku jsou postaveny na objektivních ukazatelích, čímž přispívají k transparentnímu a měřitelnému přístupu k hodnocení výkonnosti letišť.

2. Metodika a metody zkoumání

Metodický přístup tohoto článku kombinuje teoretickou rešerši s praktickou aplikací kvantitativní analýzy. Z hlediska metodického byla provedena rozsáhlá analýza vědecké literatury z let 2014–2024, která mapovala přístupy ke konkurenci a konkurenceschopnosti letišť, s důrazem na evropský kontext a regionální letiště [5]. Na základě těchto poznatků bylo definováno 9 klíčových faktorů konkurenceschopnosti, mezi něž patří např. počet cestujících, kapacita terminálu, počet destinací, přepravený náklad nebo napojení na dopravní infrastrukturu [4][5].

Faktory	Letiště Brno–Tuřany	Letiště Ostrava Leoš Janáčka
Velkost spádové oblasti	↓	↑
Počet odbavených cestujících	↑	↓
Hodinová kapacita terminálu pro cestující	↑	↓
Přepravený náklad	↓	↑
Počet alternativ dostupnosti letiska pro cestujícího	↓	↑
Počet pravidelných dopravců	=	=
Počet charterových dopravců	↑	↓
Celkový počet destinací (letní sezóna)	↑	↓
Vhodnost vzletové a přistávací dráhy pro zvolený kritický typ letadla A380	↓	↑

Obrázek 8: Srovnání z hlediska zvolených faktorů konkurenceschopnosti

V rámci výzkumu byla navržena metodika indexového hodnocení konkurenceschopnosti. Vytvořený index konkurenceschopnosti byl spočítán ve dvou variantách:

Nevážený index: všechny faktory mají stejnou váhu, což zajišťuje jednoduchost a přímé porovnání,

Vážený index: faktorům jsou přiřazeny váhy dle jejich významu, stanovené expertním odhadem (např. počet cestujících má vyšší váhu, než počet charterových dopravců).

Data byla kvantifikována dvěma způsoby:

Binární metodou (0 nebo 1), u faktorů jako přítomnost železniční dopravy,

Relativní hodnotou – např. poměr počtu cestujících Brno/Ostrava.

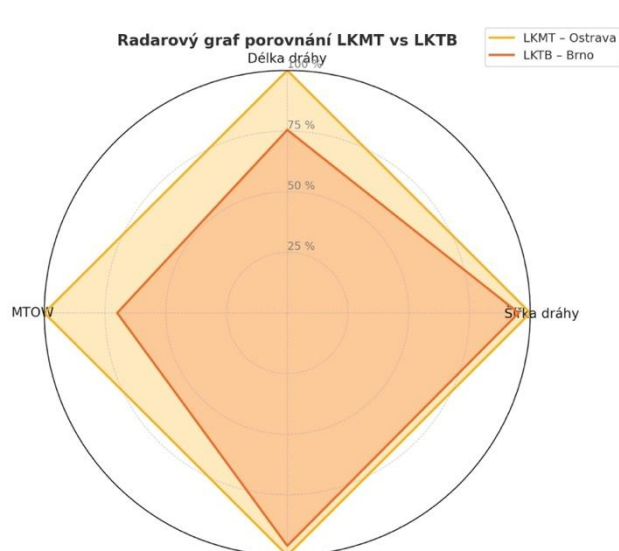
Pro srovnání byly použity veřejně dostupné zdroje – výroční zprávy obou letišť, odborné články a data z institucí jako ACI EUROPE. Veškerá data byla vztahena k roku 2023, aby bylo zajištěno jednotné časové srovnání. Index byl následně aplikován k identifikaci výkonnostních rozdílů a výpočtu celkové konkurenceschopnosti.

Tabulka faktorů AD		
Č.	Faktor	Váha
1.	Velikost spádové oblasti	0,2
2.	Počet odbavených cestujících	0,2
3.	Hodinová kapacita terminálu pro cestující	0,1
4.	Přepravený náklad	0,05
5.	Počet alternativ dostupnosti letiště pro cestujícího	0,05
6.	Počet pravidelných dopravců	0,1
7.	Počet charterových dopravců	0,1
8.	Celkový počet destinací (letní sezóna)	0,15
9.	Vhodnost vzletové a přistávací dráhy pro zvolený kritický typ letadla.	0,05
SUMA (Σ)		1

Obrázek 9: Váhy jednotlivých faktorů

3. Výsledky

Výsledky jsou založeny na systematickém porovnání letišť Brno–Tuřany s referenčním letišťem Leoše Janáčka Ostrava. Pro analýzu byla využita metodika indexu konkurenceschopnosti, a to ve dvou variantách – nevážené a vážené. Tento index slouží k objektivnímu srovnání výkonnosti letišť na základě devíti kvantifikovaných faktorů, které byly identifikovány jako klíčové na základě rešerše odborné literatury.



Obrázek 10: Radarový graf porovnání Brno a Ostrava

1. Počet odbavených cestujících

Letiště Brno–Tuřany dosáhlo v roce 2023 celkového počtu 686 867 odbavených cestujících, což představovalo 46% meziroční nárůst oproti roku 2022. Naproti tomu letiště Ostrava obsloužilo 342 932 cestujících, tedy přibližně polovinu oproti Brnu. Tento rozdíl je zásadní, protože právě počet cestujících je jedním z nejvýznamnějších indikátorů výkonnosti letiště a zároveň faktorem s nejvyšší váhou ve váženém indexu. Vyšší počet cestujících přispívá nejen k lepšímu využití kapacit, ale také ke zvýšení příjmů z vedlejších činností – duty free obchodů, parkování či pronájmu prostor.

2. Počet destinací

Dalším důležitým parametrem je šíře nabídky destinací. Letiště Brno v roce 2023 nabízelo 29 destinací, zatímco Ostrava pouze 16. Tato výrazná převaha svědčí o lepší schopnosti letiště Brno přilákat dopravce a otevřít nové linky. Destinace pokrývaly především turisticky atraktivní oblasti jako Mallorca, Burgas, Heraklion, Djerba, Antalya, Řím, Londýn nebo Milán. Vyšší počet destinací zvyšuje atraktivitu letiště jak pro cestující, tak pro dopravce, a zajišťuje stabilnější provoz i v sezónních výkyvech.

3. Hodinová kapacita terminálu

Letiště Brno disponuje moderním terminálem s hodinovou kapacitou 1000 osob, zatímco terminál v Ostravě umožňuje odbavení pouze 500 osob za hodinu. Vyšší kapacita terminálu umožňuje flexibilnější odbavení během špiček a větší odolnost vůči zpožděním či provozním výpadkům. Letiště Brno navíc v roce 2023 realizovalo investice do modernizace nástupních schodů pro letadla typu Boeing 787 Dreamliner, což svědčí o jeho připravenosti na obsluhu větších letadel a o strategickém směřování k růstu.

4. Počet pravidelných a charterových dopravců

Letiště Brno spolupracovalo v roce 2023 s 2 pravidelnými dopravci (Ryanair a Smartwings) a s 6 charterovými dopravci (např. Aegean Airlines, Freebird Airlines, Neos, Bulgaria Air). Ostrava obsluhovala stejný počet pravidelných dopravců, ale

pouze 4 charterové společnosti. Větší počet dopravců přináší letišti diverzifikaci rizik a větší možnosti pro rozšíření letového řádu. Charterová dopravní hrají klíčovou roli zejména v letních sezónách a jsou důležitým zdrojem příjmů pro regionální letiště.

5. Nákladní doprava (cargo)

V oblasti nákladní dopravy se projevila relativní výhoda Ostravy, která odbavila 14 123 tun zboží, zatímco Brno 11 653 tun. Ostrava dlouhodobě cílí na cargo segment a využívá své polohy i infrastruktury (delší dráha, blízkost průmyslových zón) k obsluze nákladních letů. Brno má v tomto segmentu potenciál do budoucna, zejména díky pravidelným nákladním letům do Lipska.

6. Dostupnost dopravní infrastruktury

Dopravní dostupnost je významným faktorem ovlivňujícím rozhodování cestujících. Ostrava má v tomto směru významnou konkurenční výhodu díky napojení na železniční dopravu, což je pro některé segmenty cestujících zásadní (např. firemní cestující, seniorní klientela). Brno je v současnosti dostupné pouze autobusovou linkou a osobním automobilem. Tato slabina byla reflektována v binární kvantifikaci faktoru, kde Ostrava dosáhla vyššího skóre.

7. Investice a technologické inovace

Brněnské letiště v roce 2023 investovalo přibližně 30 milionů Kč do oprav pohybových ploch a modernizace provozního vybavení. To zahrnovalo také úpravy stojánek a infrastruktury pro větší letadla, čímž letiště zvýšilo svou atraktivitu pro dopravce provozující větší typy letadel. Letiště také provozuje modernizovaný terminál, který prošel několika etapami rekonstrukce od roku 2006. Ostrava sice také modernizuje (např. nové elektrovozy pro zavazadla), ale v objemu a rozsahu investic Brnu zaostává.

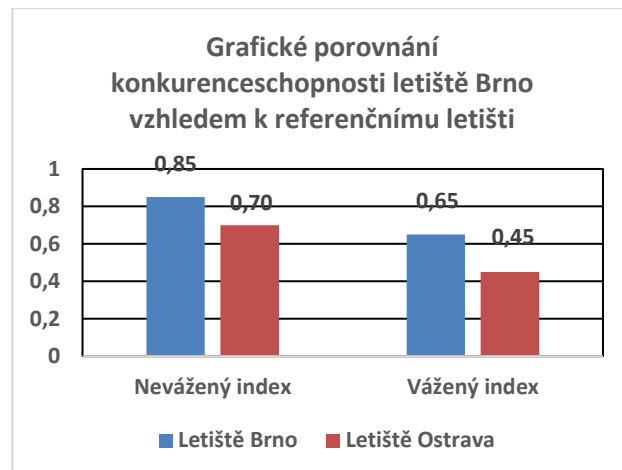
8. Spádová oblast a velikost trhu

Letiště Brno má výhodu ve velikosti své spádové oblasti, která zahrnuje přibližně 1,7 milionu obyvatel, zahrnující Jihomoravský kraj, část Vysočiny a Olomouckého kraje. Ostrava má spádovost přibližně 1,2 milionu obyvatel. Větší tržní základna zvyšuje potenciál poptávky a motivuje dopravce k otevření nových linek.

9. Výsledný index konkurenceschopnosti

Na základě kvantifikace jednotlivých faktorů byl sestaven nevážený a vážený index konkurenceschopnosti. V obou případech dosáhlo letiště Brno vyššího skóre. Ve vážené variantě, která reflektuje reálný význam faktorů, bylo skóre Brna přibližně 0,84, zatímco Ostrava dosáhla hodnoty 0,61. To dokazuje, že Brno má nejen větší výkonnost v absolutních číslech, ale i lepší výsledek v klíčových strategických oblastech, které určují dlouhodobý úspěch letiště.

Na základě výpočtu váženého indexu konkurenceschopnosti jsme získali následující výsledky:



Obrázek 11: Grafické zobrazení konkurenceschopnosti letiště Brno – Tuřany

4. Závěr

Na základě realizovaného výzkumu, který se zaměřoval na identifikaci, kvantifikaci a následné porovnání faktorů konkurenceschopnosti dvou regionálních letišť v České republice – konkrétně letiště Brno–Tuřany a letiště Leoše Janáčka Ostrava – lze konstatovat, že letiště v Brně vykazuje v současnosti vyšší úroveň konkurenceschopnosti v rámci hodnocených parametrů, než jakou dosahuje jeho referenční protějšek v Ostravě. Tento závěr vyplývá nejen z kvantitativní analýzy jednotlivých faktorů a jejich zařazení do výpočtu indexu konkurenceschopnosti, ale také z kontextuálních a kvalitativních souvislostí, které byly identifikovány při studiu obou dopravních uzlů.

Zásadní konkurenční výhodou letiště Brno–Tuřany je bezesporu schopnost přilákat vyšší počet cestujících, což se dlouhodobě odráží v rostoucích statistikách odbavených osob a současně v širší nabídce destinací, kterou letiště dokáže nabídnout svým zákazníkům. Tento fakt je zcela klíčový nejen z hlediska přímého finančního přínosu pro samotné letiště, ale také jako důležitý impuls pro rozvoj navazujících odvětví včetně cestovního ruchu, hotelnictví, služeb a regionálního podnikatelského prostředí. Brněnské letiště rovněž prokazuje vysokou míru adaptace na požadavky dopravců, a to zejména díky investicím do modernizace infrastruktury, flexibilnímu přístupu ke kapacitnímu plánování a aktivnímu rozvoji marketingových strategií, jejichž cílem je nejen udržet stávající spojení, ale také systematicky rozšiřovat jejich spektrum.

Z metodologického hlediska se ukázalo, že přístup založený na tvorbě indexu konkurenceschopnosti je nejen vhodným, ale i velmi efektivním nástrojem pro komplexní srovnání výkonnosti jednotlivých letišť. Výhodou indexového přístupu je možnost zapracování jak kvantitativních, tak kvalitativních údajů, a rovněž schopnost adaptace metodiky na specifické potřeby konkrétního hodnoceného regionu či provozního prostředí. Index umožňuje nejen momentální srovnání výkonnosti jednotlivých letišť, ale i sledování jejich vývoje v čase, a tím i vyhodnocování dopadů přijatých strategických opatření.

Zajímavým poznatkem, který ze srovnání vyplynul, je také význam faktorů, které nemusí být na první pohled dominantní (např. železniční dostupnost nebo diverzita charterových

dopravců), ale ve výsledném indexu výrazně ovlivňují skóre, a tím i pozici daného letiště v rámci regionální konkurence. To ukazuje na důležitost detailní analýzy jednotlivých složek a na nutnost nepodceňovat žádnou oblast provozu letiště – neboť právě kombinace více dílčích faktorů může zásadně ovlivnit celkový výsledek.

Z pohledu praktické aplikace lze výsledky tohoto článku doporučit jako podklad pro strategické rozhodování managementu letišť, přičemž zejména pro vedení letiště Brno–Tuřany mohou sloužit jako potvrzení, že dosavadní směr rozvoje a investic přináší měřitelné výsledky. Na druhé straně, v případě letiště v Ostravě je vhodné výsledky chápat jako výzvu pro zintenzivnění rozvojových snah, optimalizaci provozních strategií, a především hledání nových nástrojů, které by mohly posílit jeho postavení v konkurenčním prostředí regionálních letišť střední Evropy.

Zároveň je nutné upozornit na určitá metodologická omezení, která vyplývají především z dostupnosti dat, omezeného vzorku analyzovaných letišť a z použití expertně odhadovaných vah. Pro hlubší validaci navržené metodiky by bylo vhodné rozšířit analýzu o větší počet letišť a zároveň o vícero let časového pozorování, což by umožnilo zachytit dlouhodobé trendy a lépe odlišit krátkodobé výkyvy od strukturálních posunů.

Do budoucna by bylo rovněž přínosné zapojit do hodnocení další, tzv. měkké faktory, které se týkají například kvality zákaznické zkušenosti, úrovně digitálních služeb, přístupnosti pro osoby se sníženou pohyblivostí či environmentální výkonnosti. Tyto aspekty dnes získávají na důležitosti nejen z pohledu regulačních rámců (např. udržitelné financování v EU), ale také z hlediska vnímání značky letiště jak cestujícími, tak obchodními partnery.

V neposlední řadě článek poukázal na to, že konkurenceschopnost regionálních letišť není pevně danou vlastností, ale dynamickým procesem, který vyžaduje aktivní řízení, strategické plánování a neustálé sledování vnějšího prostředí. Letiště, která dokáží flexibilně reagovat na měnící se poptávku, technologické trendy a potřeby leteckých společností, mají vysokou šanci uspět i v prostředí rostoucí konkurence a omezených veřejných rozpočtů.

Reference

- [1] NOVÁK SEDLÁČKOVÁ, Alena a Tatiana REMENCOVÁ. COMPARISON OF THE ECONOMIC RESULTS AND OWNERSHIP STRUCTURES OF REGIONAL AIRPORTS IN CENTRAL EUROPEAN COUNTRIES (V4). *Transport Problems* [online]. 2022, 17(2), 33–43. ISSN 18960596, 2300861X. Dostupné z: doi:10.20858/tp.2022.17.2.03 [cit. 2025-03-14].
- [2] PASHKEVICH, Anton; NÖMMIK, Allan a ANTOV, Dago. Competitiveness Analysis of Regional Airports Based on Location Planning Models: the Case Study of Finland. 2019. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/335825548> [cit. 2025-03-21].
- [3] ŠARIĆ, Jure; ŠTIMAC, Igor; VIDOVIĆ, Andrija a MIHETEC, Tomislav. Specificity of the Franjo Tuđman Airport Position in the Function of Increasing Regional Competitiveness. 2020. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/344769365>. [cit. 2025-03-21].

- [4] GRANCAY, Martin. Evaluating Competitiveness of Airports – Airport Competitiveness Index. 2009. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/46445281_Evaluating_competitiveness_of_airports_-_Airport_competitiveness_index [cit. 2025-03-22].

- [5] SABINA DE MOURA, Fernanda Henriqueta, Mauro CAETANO a Maico Roris SEVERINO. *Airport Competitiveness Analysis from Aircraft and Passenger Movement*. *Journal of Transportation and Logistics* [online]. 2020, 143–157, ISSN 24591718. Dostupné z: doi:10.26650/JTL.2020.0015 [cit. 2025-03-14].



ANALÝZA AERODYNAMICKÝCH RIEŠENÍ KONŠTRUKCIE UAV

Oleksii Dubchenko
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Martin Bugaj
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This bachelor thesis deals with the research and analysis of aerodynamic characteristics of unmanned aerial vehicles (UAVs). For the purpose of analysis, 3D models of aircraft with conventional tailplane and V-shaped tailplane were created. Then, airflow simulation was performed using CFD, where the model with conventional tailplane had an asymmetric wing profile, while the other model had a symmetric wing profile. The aim of the analysis was to compare the aerodynamic characteristics of the models, their lift to drag (L/D) ratio and the character of the airflow around the structure. The experiments showed that the model with a conventional tail achieved a better L/D ratio than the model with a V shaped tail. Although the V-tail configuration usually reduces drag, it did not yield significant improvement in this simulation. These results may have been influenced by the wing airfoils used, as asymmetric airfoils produce more lift at low angles of attack and low airspeeds. Consequently, another experiment was performed in which a conventional tail was applied to the V-tail model. This resulted in a worse L/D ratio compared to the original configuration. The obtained results suggest potential opportunities for optimization of UAV designs to increase their aerodynamic efficiency in the future.

Keywords

UAV. CFD simulation. Lift to drag ratio. Tail configuration. Induced drag

1. Úvod

V poslednej dobe sa bezpilotné lietadlá čoraz viac používajú na rôzne účely, ako je kartografia, poľnohospodárstvo, vojenské účely a dokonca aj doručovanie. Tieto technológie výrazne menia prístup k vykonávaniu mnohých úloh, vďaka čomu sú v modernom svete nenahraditeľné. Vďaka svojej flexibilita a všetrannosti poskytujú drony nové príležitosti na zlepšenie efektivity a kvality práce. Efektívnosť používania UAV do značnej miery závisí od ich aerodynamických a letových vlastností, ako je aerodynamická jemnosť. Aerodynamická jemnosť je termín, ktorý popisuje, ako efektívne sa môže lietadlo pohybovať vzduchom a zároveň minimalizovať odpor vzduchu. Tento faktor priamo ovplyvňuje množstvo energie potrebnej na vykonanie určitej úlohy, ako je dodávka tovaru alebo monitorovanie oblastí. Energetická efektívnosť dronov je veľmi dôležitým aspektom, pretože ovplyvňuje dobu ich prevádzky, úžitok, ktorý prinesú počas prevádzky, ako aj celkovú spotrebu energie a ekonomickú realizovateľnosť ich využívania. Dnes, keď si každý uvedomil dôležitosť ekológie, sa optimalizácia spotreby energie stáva kľúčovým faktorom. Preto je vývoj a optimalizácia aerodynamických charakteristík jednou z hlavných úloh pre inžinierov pracujúcich na návrhu a vývoji bezpilotných lietadiel. Dnes inžinieri vyvíjajú technológie UAV, ktoré sú nielen efektívne, ale nie sú škodlivé pre životné prostredie. To zahŕňa zlepšovanie batérií, využívanie obnoviteľných zdrojov energie a vývoj algoritmov riadenia letu, ako je Lineárne kvadratické riadenie (LQR) UAV sú viac a viac dostupné pre širšie publikum a sú už neoddeliteľnou súčasťou mnohých priemyselných odvetví. Drony sú už schopné vykonávať zložité úlohy a s rozvojom technológií bude ich potenciál len rásť a čoskoro sa budú využívať takmer vo všetkých oblastiach, čo zjednoduší prácu a zvýši bezpečnosť ľudí. Cieľom tejto práce je analyzovať a porovnať aerodynamické charakteristiky konštrukcií rôznych bezpilotných lietadiel s cieľom identifikovať ten najlepší z

hľadiska letových výkonov. Rovnako v tejto práci chcem vysvetliť, prečo sa určité modely UAV vyberajú pre konkrétne úlohy. Práca má za cieľ prispieť k ďalšiemu rozvoju oblasti UAV optimalizáciou existujúcich modelov a zlepšením ich výkonu v rôznych aplikáciách.

2. Metodika a metódy skúmania

Pred začatím písania diplomovej práce som si stanovil hlavný cieľ - analyzovať a porovnať aerodynamické vlastnosti bezpilotných lietadiel (ďalej len UAV) s rôznymi konfiguráciami chvostových plôch s cieľom nájsť optimálne riešenia na zlepšenie letovej účinnosti. Začal som rešeršou literatúry, v ktorej som čerpal informácie o mojej téme. Na základe odborných kníh, vedeckých článkov a online zdrojov som vyhľadal informácie o základných princípoch aerodynamiky bezpilotných lietadiel, ako aj o súčasnom stave v tomto odvetví. Ako metódu výskumu som si zvolil analýzu literatúry v kombinácii s využitím metódy počítačovej analýzy prúdenia vzduchu (CFD) v prostredí ANSYS Fluent. Metódy literárnej analýzy a počítačovej simulácie boli zvolené preto, lebo umožňujú objektívne a efektívne posúdiť aerodynamické vlastnosti rôznych UAV konfigurácií bez nutnosti drahého a časovo náročného experimentálneho testovania. Na základe získaných poznatkov a výsledkov simulácií boli vypracované závery o vhodnosti jednotlivých konštrukčných riešení pre zvolenú aplikáciu UAV.

3. Výsledky

Pre účely analýzy boli vytvorené 3D modely lietadiel s konvenčnou chvostovou plochou a chvostovou plochou v tvare V, pričom model s konvenčnou chvostovou plochou mal asymetrický profil krídla, zatiaľ čo druhý model mal symetrický profil. Experimenty ukázali, že model s konvenčnou chvostovou plochou dosiahol lepší pomer L/D ako model s chvostovou

plochou v tvare V. Napriek tomu, že V-chvostová konfigurácia zvyčajne znižuje odpor vzduchu, v tejto simulácii nepriniesla výrazné zlepšenie. Následne bol vykonaný ďalší experiment, v ktorom bol na model s V-chvostom aplikovaný konvenčný chvost. Výsledkom bol horší pomer L/D v porovnaní s pôvodnou konfiguráciou. Výsledky tiež ukázali, nakoľko je dôležité zvoliť správny profil krídla pre konkrétne účely použitia.

4. Záver

Výskum aerodynamických vlastností bezpilotných lietadiel s rôznymi konfiguráciami chvosta je dôležitým príspevkom k efektívnemu návrhu bezpilotných systémov. Konfigurácia chvosta môže významne ovplyvniť letové vlastnosti, aerodynamickú jemnosť a spotrebu energie. Cieľom tejto práce bolo analyzovať rôzne konštrukcie bezpilotných lietadiel, preto sa táto práca zamerala na porovnanie dvoch bežne používaných typov chvostového usporiadania: konvenčného a s V-chvostom, z hľadiska ich aerodynamickej účinnosti. V rámci tejto práce sa vykonala séria výpočtov numerickej simulácie prúdenia (CFD) s cieľom analyzovať rozdiely medzi konvenčnou konfiguráciou chvostovej plochy a chvostovou plochou v tvare V a následne vyhodnotiť, ako tieto zmeny ovplyvňujú celkovú aerodynamickú jemnosť modelu. Na základe vykonaných simulácií možno konštatovať, že najvyšší pomer vztlaku a odporu (L/D) dosiahol model s konvenčnou konfiguráciou chvosta 8.25. Chvost v tvare V vykazoval o niečo nižšiu hodnotu 7.96, čo je stále prijateľný výsledok. Takéto údaje mohli byť spôsobené profilom krídla NACA 0015, ktorý je hrubší. Zaujímavým výsledkom bolo, že kombinácia geometrie druhého modelu s konvenčnou konfiguráciou chvosta viedla k výraznému zníženiu pomeru L/D na hodnotu 6.28, čo poukazuje na významnú vzájomnú závislosť medzi tvarom trupu a typom konfigurácie chvosta. Zatiaľ čo klasické usporiadanie poskytlo v jednom prípade najvyšší pomer vztlaku k odporu, v inom prípade sa ako efektívnejšie ukázalo práve V-chvostové usporiadanie, ktoré zrejme znížilo interferenčný a tvarový odpor vďaka kompaktnejšej konštrukcii a priaznivejšiemu obtekaníu zadnej časti trupu. Optimálna aerodynamická konfigurácia si teda vyžaduje komplexný prístup k návrhu, pri ktorom sa jednotlivé prvky nemôžu posudzovať izolovane. Výsledky tiež ukázali, nakoľko je dôležité zvoliť správny profil krídla pre konkrétne účely použitia. Aj malé zmeny v geometrii môžu mať výrazný vplyv na výsledné letové vlastnosti.

Referencie

- ANDERSON, J. D. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics*. 6th edition. New York: McGraw-Hill Education. ISBN 978-1-259-29314-2
- BUGAJ, M. (2015). *Aeromechanika I. Základy aerodynamiky*. Bratislava: Žilinská univerzita. ISBN 9788097041939
- DURMUŞ, S. (2023). Aerodynamic Performance Comparison of Airfoils in Flying Wing UAV. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 7(1), 123–127. ISSN 2587-1943. DOI: <https://doi.org/10.46460/ijiea.1169652>
- FAHLSTROM, P. G.; GLEASON, T. J.; SADRAEY, M. H. (2022). *Introduction to UAV Systems*. 5th edition. Hoboken, New Jersey: Wiley. ISBN 9781119802580

PRASETYO, E.; YUSOFF, N.; YAZID, A. A. (2008). Airfoil Design for Flying Wing UAV. *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics (MECHANICS '08)*. ISBN 978-960-474-046-8. ISSN 1790-2769.

RIBEIRO, C. A.; VALENTE, D.; RAMOS, J.; SOUSA, J. (2024). A unified and modular aerodynamic database for preliminary aircraft design and optimization. *Scientific Reports*, 14, Article number: 10121. ISSN 2045-2322. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68927-1>

RODRIGUES, D. P. (2024). *Design, Analysis and Optimization of a Tail for a Civil UAV*. Master's Thesis, Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia (FEUP).

ROY, S.; DAS, B.; BISWAS, A. (2021). Influence of Camber Ratio and Thickness Ratio on the Airfoil Performance. In: *Recent Advances in Mechanical Engineering. ICRAME 2020*. Singapore: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-7711-6_72

SADRAEY, M. H. (2012). Chapter 6: Tail Design. In: *UAV Aerodynamics, Structural Design and Control*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). ISBN 978-1-60086-921-4.



IDENTIFIKÁCIA POVETERNOSTNÝCH PODMIENOK NA ZÁKLADE VÝSKYTU OBLAKOV

Anna Fomina
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Miriám Jarošová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article focuses on the relationship between different cloud types and specific weather phenomena, as well as the potential of using cloud observations for short-term weather forecasting. The research is based on the analysis of METAR reports collected at Žilina Airport during the summer months of 2024 (June–August). The study aims to identify typical features of cloud development under various synoptic conditions—such as the passage of cold fronts, periods of atmospheric stabilization, and the occurrence of convective storms. The goal is to evaluate the extent to which visual observations of clouds can improve the effectiveness of short-term forecasts and complement standard meteorological methods, thereby supporting aviation safety.

Keywords

Cloud, METAR reports, Convective storms, Cold fronts, Atmospheric

1. Úvod

Počasie je jedným z najdôležitejších faktorov ovplyvňujúcich každodenný život ľudí, dopravu, poľnohospodárstvo a mnoho ďalších oblastí. Jedným zo základných prvkov meteorológie sú oblaky, ktoré sú vizuálnym indikátorom atmosférických procesov a umožňujú predikciu poveternostných zmien. Ich tvar, výška a dynamika poskytujú cenné informácie o aktuálnom stave atmosféry a možných vývojových trendoch.

Meteorológia je veda, ktorá sa zaoberá skúmaním atmosféry, jej fyzikálnych a chemických vlastností, ako aj procesov, ktoré v nej prebiehajú. Meteorológia pochádza z gréckych slov „meteor“ - nebeský jav a „logos“ - náuka. Hlavným cieľom meteorológie je predpovedanie počasia a analyzovanie klimatických podmienok na základe rôznych atmosférických faktorov, ako sú teplota, tlak, vlhkosť, vietor a zrážky. Okrem toho skúma aj extrémne poveternostné javy, ako sú búrky, hurikány, tornáda či vlny horúčav, a ich vplyv na prírodu a spoločnosť.

Tento článok sa zameriava na analýzu poveternostných podmienok na letisku Žilina prostredníctvom pozorovania oblačnosti, so zreteľom na jej významný vplyv na bezpečnosť leteckej prevádzky. Hlavným cieľom je preskúmať súvislosti medzi rôznymi typmi oblakov a špecifickými poveternostnými javmi, ako aj poukázať na možnosti ich využitia pri krátkodobej predikcii vývoja počasia. V práci sú podrobne rozobrané nebezpečné javy súvisiace s oblačnosťou, klasifikácia oblakov, vplyv tlakových útvarov (nízky a vysoký tlak vzduchu) na tvorbu oblakov a oblačnosť ako takú. Ďalej sa venuje aj atmosférickým frontom a ich dopadu na leteckú prevádzku, ako aj na dynamiku tvorby oblačnosti.

2. Oblačnosť

2.1. Klasifikácia a typy oblakov

Oblaky pozostávajú z drobných kvapôčok vody alebo kryštálikov ľadu, ktoré sa označujú ako oblačné prvky. Ich zloženie závisí od teploty:

- Pri teplotách nad -10°C sú tvorené prevažne vodnými kvapôčkami.
- V rozmedzí -10°C až -15°C obsahujú zmes kvapôčok a kryštálikov ľadu.
- Pod -15°C majú prevažne kryštalickú štruktúru.

Keď sa oblačné prvky zväčšia a ich hmotnosť spôsobí zrýchlený pád, dochádza k vzniku zrážok.

Oblaky zohrávajú zásadnú úlohu v letectve, keďže priamo ovplyvňujú bezpečnosť, komfort a efektívnosť letov. Vodná para zohráva dôležitú úlohu v dynamike atmosféry. Napríklad uvoľňovanie veľkého množstva latentného tepla v dôsledku kondenzácie v konvekčných oblakoch hrá dôležitú úlohu vo všeobecnej cirkulácii. Znalosť rozloženia oblakov a ich prenosu je nevyhnutná na pochopenie dynamiky atmosféry.

2.1.1. Klasifikácia oblakov podľa výšky

Svetová meteorologická organizácia (WMO) rozdeľuje oblaky do troch základných výškových kategórií:

- A) Nízke oblaky (do 2000m nad zemou)

Tieto oblaky sa nachádzajú v spodnej časti troposféry a môžu mať významný vplyv na viditeľnosť a počasie. Sem patria:

Stratus (St) sú nízke oblaky zložené z malých vodných kvapiek alebo pri nízkych teplotách z ľadových kryštálikov. Javia sa ako pevná sivá vrstva bez jasnej štruktúry a netvorí halo.

Stratocumulus (Sc) sú oblaky, ktoré sa skladajú prevažne z vodných kvapiek, menej často zo snehových kryštálikov a vločiek. Majú nadýchaný vzhľad a vytvárajú sivé alebo belavé škvrny, polia či vrstvy.

Nimbostratus (Ns) sú hrubé a tmavé oblaky, ktoré pokrývajú oblohu a prinášajú dlhodobé a výdatné zrážky. Skladajú sa z dažďových kvapiek, prechladených vodných kvapiek, snehových kryštálikov, vločiek alebo ich kombinácie. Slnko cez nich vôbec nepresvítá.

B) Stredné oblaky (2 000 – 7 000 m nad zemou)

Tieto oblaky obsahujú prevažne vodné kvapky, no pri nižších teplotách môžu obsahovať aj ľadové kryštály. Patria sem:

Altostratus (As) sú oblaky strednej výšky, signalizujúce zmenu počasia, ktoré sa skladajú prevažne z vodných kvapôčok, pričom pri veľmi nízkych teplotách môžu obsahovať aj ľadové kryštály. Majú typický vzhľad bielych alebo sivých škvrn, polí či vrstiev, ktoré často vrhajú vlastný tieň.

Altostratus (As) sú oblaky strednej výšky, ktoré sa skladajú z kombinácie ľadových kryštálov, vodných kvapiek, dažďových kvapiek a snehových vločiek. Tieto oblaky vytvárajú šedú alebo tmavošedú vrstvu, ktorá buď úplne, alebo čiastočne pokrýva oblohu.

C) Vysoké oblaky (nad 7 000 m nad zemou)

Tieto oblaky sú zložené prevažne z ľadových kryštálov a zriedkavo prinášajú zrážky na zemský povrch. Medzi ne patria:

Cirrus (Ci) sú oblaky, ktoré sú úplne tvorené ľadovými kryštálkami. Majú charakteristický vzhľad malých, oddelených oblakov s jemnou vláknitou štruktúrou. Tieto oblaky sa môžu tvoriť ako malé škvrny, chumáčky alebo nepravidelné zhluky, ktoré môžu byť priamočiare alebo jemne ohnuté do vlákien.

Cirrocumulus (Cc) sú oblaky, ktoré sú tvorené prevažne ľadovými kryštálmi. Vznikajú, keď silne premrznuté vodné kvapky rýchlo zamrznú na ľadové kryštály. Tieto oblaky sa prejavujú ako malé biele škvrny, vločky alebo vlnky, ktoré môžu tvoriť rôzne polia alebo vrstvy. Cez tieto oblaky nie je vidieť žiadne tieň, a sú usporiadané viac či menej pravidelne.

Cirrostratus (Cs) sú oblaky, ktoré sa skladajú prevažne z ľadových kryštálov. Majú vzhľad tenkých pruhov alebo vytvárajú jemný, hmľistý závoj s vláknitou štruktúrou. Okraje týchto oblakov bývajú zvyčajne rozstrapkané, niekedy aj ostré. Cez tieto oblaky presvítá slnko, čo znamená, že na zemi môžu vzniknúť tieň. Oblohu môžu úplne alebo čiastočne zakryť a často sa pri nich objavujú halové javy.

2.1.2. Klasifikácia oblakov podľa tvaru a štruktúry

Okrem výškovej klasifikácie možno oblaky rozdeliť aj na základe ich tvaru a štruktúry:

Oblaky s vertikálnym vývojom. Tieto oblaky sa tvoria v dôsledku silného stúpavého prúdu teplého vzduchu a môžu siahať od nízkych do vysokých výšok. Patria sem:

Cumulus (Cu) sú oblaky, ktoré sa skladajú predovšetkým z vodných kvapôčok. Ľadové kryštály sa v nich vytvárajú iba v častiach, kde teplota klesne hlboko pod bod mrazu. Tieto oblaky sú typické svojím hustým, dobre ohraničeným tvarom a vertikálnym vývojom. Často pripomínajú kupoly, kopce alebo vežičky, pričom ich horná časť môže mať vzhľad karfiolu. Okraje bývajú dynamické, rýchlo sa menia a niekedy sú rozstrapkané.

Cumulonimbus (Cb) je typ oblaku, ktorý má plochý, stenovitý tvar, je veľmi tmavý, hustý, vysoký a veľký. Tieto oblaky sú známe aj ako búrkové oblaky, ktoré môžu prinášať krupobitie, hromy alebo blesky. Cumulonimbové oblaky vznikajú z cumuloých oblakov, ktoré vznikajú v dôsledku stúpania a kondenzácie vzduchu na oblohe. Vo vnútri oblaku sa nachádzajú silné výstupné a zostupné prúdy, ktoré môžu dosahovať rýchlosť desiatok metrov za sekundu, čím vytvárajú extrémnu turbulenciu. Teplota v jeho hornej časti môže klesnúť až pod -55 °C, pričom hladina ľadových jadier sa pohybuje okolo -12 až -15 °C. Elektrické náboje v oblaku sú rozložené tak, že kladný náboj sa nachádza v hornej časti, zatiaľ čo záporný v dolnej. V oblasti zrážok sa však môže vytvoriť ďalšie kladné centrum v blízkosti základne, čo vedie k častým bleskovým výbojom.

2.2. *Oblasti nízkeho a vysokého tlaku vzduchu a ich vplyv na oblačnosť*

Tlak vzduchu (atmosférický, barometrický tlak) je základný meteorologický prvok. Je to vlastne sila vyvolaná tiažou vzduchového stĺpca, siahajúceho od hladiny v ktorej tlak zisťujeme až po hornú hranicu atmosféry.

Oblasti tlakovej nízke sa tvoria v dôsledku rôznych procesov v atmosfére. Najčastejšie vznikajú, keď sa teplý vzduch dostáva nad chladnejší vzduch, čím dochádza k nestabilite. Keďže teplejší vzduch je ľahší, začne stúpať, pričom sa ochladzuje a vedie k tvorbe oblačnosti a zrážok. Cyklóny prinášajú so sebou zrážky, oblačnosť, silný vietor a teplotné výkyvy.

Oblasť s vysokým tlakom, známa aj ako anticyklóna, je oblasť so zvýšeným atmosférickým tlakom v porovnaní s okolím. Charakteristickým znakom vysokotlakových systémov je klesajúci vzduch, ktorý sa postupne otepluje, čím dochádza k rozptylu oblakov a stabilnému, suchému počasiu. V takýchto podmienkach je obloha prevažne jasná, prípadne sa objavujú iba vysoké riedke oblaky, ako napríklad Cirrus alebo Cirrostratus. Oblasť s vysokým tlakom prinášajú stabilné, suché a jasné počasie. Vysoký tlak podporuje slnečné dni, ale v zime môže spôsobiť inverzie a smog.

2.3. *Atmosférické fronty a ich vplyv na leteckú prevádzku a tvorbu oblakov*

Atmosférické fronty sú rozhrania medzi dvoma vzduchovými hmotami s rôznymi teplotnými a vlhkosťnými charakteristikami. Ich prechod prináša významné zmeny v počasí a môže výrazne ovplyvniť bezpečnosť leteckej dopravy.

Teplý front predstavuje rozhranie medzi teplou a chladnejšou vzduchovou hmotou, pričom teplý vzduch sa postupne presúva nad chladnejší, hustejší vzduch. Tento proces spôsobuje jeho ochladzovanie, kondenzáciu vodnej pary a následnú tvorbu oblakov a zrážok.

Keď studený vzduch postupuje rýchlejšie ako teplý vzduch, v dôsledku vyššej hustoty sa podsúva pod teplý vzduch a vytláča

ho do vyšších vrstiev atmosféry. Tento proces vytvára styčnú plochu nazývanú studený front. Výstupné pohyby vzduchu sú pri tomto fronte výraznejšie ako pri teplom fronte.

Oklúzia je meteorologický jav, ktorý nastáva, keď sa studený front pohybuje rýchlejšie doženie teplý front pred sebou. V tomto momente sa teplý vzduch medzi nimi vytlačí nahor, pretože je ľahší než studený vzduch pred aj za ním, a stráca kontakt so zemským povrchom.

Oklúzny front je teda výsledkom tohto procesu – spojenie teplého a studeného frontu do jedného spoločného frontu, ktorý má znaky oboch. V tejto oblasti môžeme pozorovať intenzívne zrážky, vertikálne prúdenie vzduchu a nestabilné počasie.

Existujú dva typy oklúzných frontov:

- Studená oklúzia – ak vzduch za studeným frontom je chladnejší než vzduch pred teplým frontom.
- Teplá oklúzia – ak vzduch za studeným frontom je síce studený, ale teplejší než vzduch pred teplým frontom.

2.4. Letisko Žilina

Letisko Žilina (ICAO kód: LZZI) sa nachádza na severozápade Slovenska, približne 10 km východne od mesta Žilina, pri obci Dolný Hričov. Bolo vybudované v 70. rokoch 20. storočia ako náhrada za prepadnuté letisko Brazovský Majer, ktoré ustúpilo rozvíjajúcemu sa mestu Žilina.

Letisko Žilina je domovom Fakulty prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov Žilinskej univerzity, konkrétne jej leteckej fakulty. Služi ako hlavná tréningová základňa pre študentov odboru profesionálny pilot a letecká doprava.

Geograficky sa letisko nachádza v údolí rieky Váh, ktorá preteká neďaleko. Je obklopené horami – na sever a severovýchod sa nachádza pohorie Kysucká vrchovina, na juhovýchod Malá Fatra, čo vytvára špecifické podmienky pre lietanie, najmä z hľadiska turbulencií a veterných javov.

2.5. POZOROVANIE A KÓDOVANIE OBLAKOV

Pozorovanie výskytu oblakov je veľmi dôležité, pretože oblaky sú jedným z hlavných vizuálnych ukazovateľov aktuálneho a nadchádzajúceho počasia. Podľa typu, výšky, tvaru a dynamiky oblakov možno do značnej miery predpovedať, aké poveternostné podmienky môžeme očakávať neskôr počas dňa, čo je dôležité najmä pre plánovanie letov a bezpečnosť letovej prevádzky.

2.5.1. Kódovanie množstva oblačnosti

V METAR kódach sa množstvo oblačnosti označuje medzinárodnými skratkami. Tie určujú, koľko osmin (oktántov) oblohy je pokrytých oblakmi. Presný popis môžeme vidieť na tabuľke č. 1.

Tabuľka 1: Medzinárodné skratky množstva oblačnosti;

Kód všeobecne	Slovensky	Pokrytie oblohy
SKC	Jasno (žiadne oblaky)	0/8
FEW	Málo oblakov	1–2/8
SCT	Riedka oblačnosť, rozptýlená oblačnosť	3–4/8
BKN	Oblačno	5–7/8
OVC	Zatiahnuté (obloha celá)	8/8
NSC	Žiadna významná oblačnosť	(používa sa, keď oblaky neovplyvňujú IFR lety, napr. sú vyššie ako 5000 ft)

Zdroj: Vlastné spracovanie podľa www.arefiev-dm.livejournal.com

Za skratkou (napr. FEW) nasleduje trojčísle, ktoré označuje výšku základne oblakov v stovkách stôp nad úrovňou letiska:

- BKN020 = oblačnosť 5–7/8 na výške 2000 stôp.
- FEW030 = málo oblakov na výške 3000 stôp.

Ak sú pozorované nebezpečné oblaky, ako napríklad Cumulonimbus (Cb) alebo Towering Cumulus (TCU), sú výslovne uvedené v správe:

- FEW020CB – mále množstvo oblakov vo výške 2000 ft, typ Cumulonimbus (možné búrky).
- SCT030TCU – riedke Towering Cumulus vo výške 3000 ft (možné silné turbulencie)

2.6. Dôležitosť oblakov v letných mesiacoch

Vývoj oblačnosti počas letných mesiacov zohráva kľúčovú úlohu pri hodnotení meteorologických podmienok pre letectvo, predovšetkým z hľadiska bezpečnosti a plánovania letov. V letnom období, v dôsledku intenzívneho slnečného žiarenia, dochádza k výraznému ohrevu zemského povrchu, čo podporuje vznik konvektívneho prúdenia a následnú tvorbu kopovitej oblačnosti, ktorá sa za priaznivých podmienok môže rýchlo vyvinúť do kopovitej oblačnosti s dažďom (Cb).

V ranných a dopoludňajších hodinách sú letové podmienky vo všeobecnosti priaznivejšie, pretože atmosféra je stále relatívne stabilná a vývoj konvektívnej oblačnosti je v počiatočnom štádiu. Skorý výskyt oblakov Cumulus s rýchlym vertikálnym rastom v dopoludňajších hodinách často signalizuje možnosť vývoja búrok alebo prehánok v popoludní. V tomto čase je bezpečné lietať, najmä ak sa pravidelne sleduje aktuálny vývoj počasia.

V popoludňajších a večerných hodinách sa zvyčajne konvekcia vyvíja silnejšie, čo môže viesť k tvorbe búrkových oblakov a zhoršiť letové podmienky. V takýchto prípadoch sa odporúča lety obmedziť alebo úplne prerušiť, alebo len pri dôkladnom plánovaní a aktívnom vyhýbaní sa nebezpečným oblastiam, ako sú napríklad jadrá búrok alebo oblasti s výraznou turbulenciou.

Tieto vizuálne indikátory, v kombinácii s meteorologickými meraniami (napr. tlak, teplota, vlhkosť), umožňujú včas identifikovať potenciálne rizikové javy, ako sú búrky, zrážky, veterné poryvy či zhoršenie viditeľnosti. Pre personál letísk aj pre pilotov je preto sledovanie vývoja oblačnosti dôležitou

súčasťou predletovej prípravy a rozhodovania o vhodnosti vykonania letov.

3. Záver

Cieľom článku bolo oboznámenie užívateľa o základných typoch oblakov, atmosférických frontoch a takže o oblastiach s nízkym a vysokým tlakom. Pomocou týchto informácií vieme predikovať následný vývoj oblačnosti a s ním aj spojený vývoj nebezpečných javov pre leteckú dopravu.

Treba si uvedomiť že aj keď sa podľa typu oblakov dá určiť predpoklad poveternostných podmienok, je potrebné brať do úvahy aj ďalšie faktory, ako sú tlak, teplota, vlhkosť a vietor. Kombinácia týchto prvkov spolu s vývojom oblačnosti umožňuje presnejšie predpovedať možné nebezpečné javy a rozhodnúť, či sú podmienky vhodné na leteckú prevádzku.

Významným zistením v tomto článku je, že aj keď pozorovanie oblačnosti môže poskytnúť užitočné indikátory pre predpovedanie poveternostných podmienok, stále je potrebné na tieto údaje reagovať v reálnom čase, prispôbovať letové plány a byť pripravený na dynamické zmeny počasia.

Referencie

E. Borozdinova, „Znanie.Viki,“ 31. Január 2025. [Online]. Available: <https://znanierussia.ru/articles/%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D0%B0>. [Cit. 3. február 2025].

Y. Z. M. W. Jihu Liu, „Cloud Susceptibility to Aerosols: Comparing Cloud-Appearance Versus Cloud-Controlling Factors Regimes,“ 19. Júl 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1029/2024JD041216>. [Cit. 25. november 2024].

Kstst, „Klub slovenských turistov,“ [Online]. Available: <https://www.kstst.sk/pages/vht/meteo/oblaky2.htm>. [Cit. 6. november 2024].

F. Rais, „Journal of Logistics, Informatics and Service Science,“ Prediction of Cumulonimbus Clouds in Airport Vicinity using NOAA Satellite Imagery and Random Forest, %1. vyd.36, pp. 35-36, 2020.

Kstst, „Klub Slovenských Turistov Stará Turá,“ [Online]. Available: <https://www.kstst.sk/pages/vht/meteo/tlak.htm>. [Cit. 14. marec 2025].

Slovenský Hydrometeorologický Ústav, „SHMÚ Slovník,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.shmu.sk/sk/?page=1095>. [Cit. 14. marec 2025].

National Geographic Society, „National Geographic,“ 1996-2025. [Online]. Available: <https://education.nationalgeographic.org/resource/coriolis-effect/>. [Cit. 14. marec 2025].

SHMÚ, „Na Obzore,“ 14. Máj 2018. [Online]. Available: <https://naobzore.net/clanok/210-Co-a-ako-tlakove-vyse>. [Cit. 20. marec 2025].

Kstst, Klub Slovenských Turistov, „VHT > Meteo > Atmosférické fronty,“ [Online]. Available: <https://www.kstst.sk/pages/vht/meteo/fronty.htm>. [Cit. 10. apríl 2025].

Povetrie SK, „Povetrie Teplý Front,“ 26. február 2023. [Online]. Available: <https://www.povetrie.sk/2023-02/co-je-to-teply-front/>. [Cit. 10. apríl 2025].

Meteo Info SK, „Informácie o počasi na Slovensku,“ 3. december 2011-2012. [Online]. Available: <https://meteoinfo.sk/clanok/50598-utorok-v-znameni-okluzneho-frontu>. [Cit. 12. apríl 2025].

MAM MULTIMEDIA, „Letisko SK,“ 2013-2025. [Online]. Available: <https://www.letisko.sk/historia/>. [Cit. 8. marec 2025].

MeteoCenter, „Meteo Center,“ 17. november 2017. [Online]. Available: <https://meteocenter.net/meteolib/metar.htm>. [Cit. 14. apríl 2025].



DOPAD VOJENSKÝCH KONFLIKTOV A POLITICKÝCH NEPOKOJOV NA LETECKÚ DOPRAVU

Laura Gardianová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Alena Novák-Sedláčková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The aim of this paper is to present the impact of armed conflicts and political unrest on civil aviation, with a focus on identifying threats and analyzing the aviation sector's responses to destabilizing factors. The paper examines the influence of geopolitical events on the functioning of air transport, analyzing specific cases of countries affected by armed conflicts or domestic unrest. Attention is paid to the measures adopted in the affected airspaces and their impact on airlines, passengers, and the economy of the sector. The research also includes an assessment of the effectiveness of international sanctions related to civil aviation and their influence on the safety and continuity of air services. It focuses on the analysis of economic and operational consequences, as well as identifying possible approaches to enhancing the resilience of air transport to similar threats in the future. In conclusion, the thesis presents proposed measures that could contribute to more effective crisis management and maintaining stability in the field of civil aviation even during times of geopolitical tension. The results highlight the importance of early risk identification and the necessity of a coordinated international response aimed at minimizing the negative consequences for air transport.

Keywords

air transport, armed conflicts, political unrest, safety, airspace, airlines, sanctions

1. Úvod

Letecká doprava je dôležitým pilierom globálnej mobility, medzinárodného obchodu a hospodárskej prepojenosti. Napriek technickému pokroku a neustálemu zvyšovaniu bezpečnostných štandardov zostáva civilné letectvo mimoriadne citlivé na vonkajšie destabilizačné faktory. Vojenské konflikty a politické nepokoje predstavujú jedny z najväčších hrozieb, ktoré môžu narušiť fungovanie leteckej dopravy, ohroziť bezpečnosť civilných letov a mať ďalekosiahle ekonomické dôsledky.

Cieľom tohto článku je priblížiť čitateľovi, aký dopad majú ozbrojené konflikty a vnútroštátne nepokoje na civilné letectvo v rôznych častiach sveta. Dôraz je kladený na identifikáciu kľúčových rizík, ktoré ovplyvňujú bezpečný prelet lietadiel, plánovanie letových trás a dostupnosť vzdušného priestoru. Článok zároveň analyzuje reakcie jednotlivých štátov, medzinárodných organizácií a leteckých spoločností na tieto výzvy a hodnotí efektivitu prijatých bezpečnostných a regulačných opatrení.

Zásadným míľnikom v novodobej histórii bezpečnosti letectva boli udalosti z 11. septembra 2001, ktoré podnietili celosvetové zmeny v prístupe k ochrane civilného letectva. Odvtedy sa systém bezpečnostného manažmentu neustále vyvíja – dnes čelí výzvam nielen v podobe terorizmu, ale aj štátnych konfliktov, hybridných hrozieb či ekonomických sankcií, ktoré zasahujú oblasť letectva. Zároveň sa čoraz viac využívajú digitálne nástroje a satelitné dáta pre hodnotenie rizík a rýchlu reakciu na nové hrozby.

Štruktúra článku vychádza z metodiky výskumu. V úvode je definovaná problematika a význam letectva v geopolitickom kontexte. Nasleduje analýza aktuálnych vojenských a politických

konfliktov vo vybraných regiónoch sveta, vrátane ich príčin a konkrétnych dopadov na fungovanie letectva. Ďalšia časť sa zameriava na opatrenia, ktoré boli prijaté vo vzdušných priestoroch postihnutých krajín, a na ich ekonomické a prevádzkové dôsledky pre letecké spoločnosti. Súčasťou analýzy je aj hodnotenie sankcií uvalených na vybrané štáty a ich vplyvu na letectvo. V závere sú predstavené návrhy efektívnych opatrení, ktoré by mohli do budúcnosti zvýšiť odolnosť civilného letectva voči destabilizujúcim javom.

Zvolená téma je mimoriadne aktuálna, pretože geopolitické napätie vo svete narastá. Letecký priemysel musí preto flexibilne reagovať na nové bezpečnostné výzvy, aby mohol naďalej plniť svoju nezastupiteľnú úlohu v globálnom pohybe osôb a tovaru, a zároveň zabezpečiť ochranu životov cestujúcich a posádok.

2. Politické nepokoje a vojenské konflikty v súčasnosti

Vojenské konflikty a politické nepokoje predstavujú v súčasnom svete významný faktor, ktorý ovplyvňuje mnohé sektory, pričom civilná letecká doprava patrí medzi najcitlivejšie. Moderné vojny, hybridné útoky, dezinformácie a kybernetické hrozby menia bezpečnostné prostredie, čo si vyžaduje promptnú reakciu zo strany leteckých operátorov, regulačných orgánov a medzinárodných inštitúcií. S narastajúcou komplexnosťou geopolitických konfliktov rastie aj význam flexibilného plánovania letových trás a bezpečnostných opatrení.

Letecká doprava je ovplyvňovaná priamo aj nepriamo – hrozby ako zostrelenie lietadla, útoky na letiská či uzatvorenie vzdušného priestoru nútia spoločnosti k obchádzaniu rizikových oblastí. To vedie k zvýšeniu nákladov, predĺženiu letových časov, zníženiu komfortu a poklesu dopytu po cestovaní v daných regiónoch. Príklady ako konflikt na Ukrajine (so zatvoreným vzdušným priestorom od februára 2022), vojna v Pásme Gazy

alebo nestabilita v Sudáne jasne ukazujú, aký silný vplyv má vojna na plynulosť a bezpečnosť medzinárodnej leteckej dopravy.

Riziká sa netýkajú len samotnej prevádzky, ale aj infraštruktúry a bezpečnostných opatrení na letiskách. Mnohé letiská v konfliktných zónach zavádzajú prísne protokoly – napríklad letisko Ben Gurion v Izraeli zaviedlo strmšie vzletové a pristávacie uhly nábehu v ich trajektóriách, aby minimalizovalo riziko útokov. V Sudáne bolo letisko Chartúm vyradené z prevádzky kvôli bojom medzi ozbrojenými frakciami. Letiská v Jordánsku, Libanone a Afganistane prijali opatrenia ako sprísnené kontroly, evakuačné cvičenia či prepojenie so spravodajskými službami.

Medzinárodné organizácie ako Medzinárodná organizácia pre civilné letectvo (ICAO) a Agentúra Európskej únie pre bezpečnosť civilného letectva (EASA) zohrávajú kľúčovú úlohu pri monitorovaní rizík a poskytovaní odporúčaní. Vznikli systémy ako **EU Conflict Zone Alerting System**, ktorý zhromažďuje spravodajské a bezpečnostné informácie pre európske aerolínie. ICAO vydala **Dokument 10084**, ktorý obsahuje manuál hodnotenia rizík pri leteckej prevádzke nad konfliktnými zónami. Tieto nástroje slúžia na prevenciu tragédií ako zostrelenie letu MH17 nad Ukrajinou v roku 2014.

Konflikty v rôznych regiónoch sveta majú svoje špecifiká:

- **na Ukrajine** pretrváva hybridná vojna medzi Ruskom a Ukrajinou, s rozsiahlym vplyvom na civilnú leteckú dopravu,
- **Blízky východ** zažíva časté eskalácie, najnovšie medzi Izraelom a Hamasom, čo spôsobilo uzatvorenie vzdušného priestoru,
- **Afrika** čelí dlhodobým povstaniam, etnickým čistkám a aktivitám teroristických skupín.
- **v Ázii a Tichomorí** rastie napätie v Juhočínskom mori, kde Čína čelí sporom so susedmi.

Všetky tieto konflikty zasahujú do letectva – či už ide o presmerovanie letov, uzávierky, alebo priamy útok na infraštruktúru.

Letecké spoločnosti musia byť flexibilné, investovať do bezpečnostných technológií a plánovať alternatívne trasy. Spoločnosti ako Emirates, Lufthansa, KLM či United Airlines pozastavili alebo menili svoje lety v reakcii na aktuálne hrozby. Niektoré využívajú špeciálne bezpečnostné technológie – napríklad izraelská spoločnosť El Al má na palubách protiraketové systémy. Významným aspektom je aj výcvik pilotov na zvládnutie krízových situácií, vrátane zostupu do bezpečného koridoru alebo núdzového pristátia.

Príčiny ozbrojených konfliktov sú rozdelené do ekonomických, politických a ideologických faktorov, pričom často ide o kombináciu dlhodobých etnických, náboženských, politických a ideologických sporov, mocenských bojov, zahraničných intervencií a sociálnych rozdielov. Končia kapituláciou alebo dohodou na základe kompromisu. Dôsledky sú však rozsiahle, pretože zahŕňajú straty na životoch, ekonomické a environmentálne škody, sociálne a demografické zmeny a politickú nestabilitu.

Z dlhodobého hľadiska môžu vojenské konflikty viesť k trvalému zníženiu dopytu po leteckých službách v postihnutých oblastiach, poklesu cestovného ruchu a strate dôvery zo strany cestujúcich. Finančné dopady sa prejavujú vo forme vyšších poistných sadzieb, drahších leteniek, nákladov na palivo a logistiku. Obnova leteckej prevádzky po konflikte si vyžaduje komplexné prehodnotenie bezpečnostných štandardov, investície do infraštruktúry a medzinárodnú spoluprácu.

3. Analýza vybraných najviac zasiahnutých krajín a prijaté opatrenia v ich vzdušnom priestore

Bezpečnosť leteckej dopravy bola v posledných rokoch výrazne ovplyvnená vojenskými nepokojmi a politickými konfliktmi v rôznych regiónoch sveta, čo viedlo k prijatiu viacerých opatrení v zasiahnutých krajinách s cieľom minimalizovať riziká pre civilné lietadlá. Vzdušný priestor bol v mnohých prípadoch uzatváraný, vydávali sa varovania pre letecké spoločnosti a zavádzali sa alternatívne letové trasy, ktoré mali za cieľ zvýšiť bezpečnosť civilnej leteckej prevádzky a zároveň zmierniť ekonomické dopady týchto opatrení.

Vzdušný priestor bol podľa hodnotenia Safe Airspace net rozdelený do troch úrovní rizika. Do prvej, najnebezpečnejšej úrovne, kde bol nariadený zákaz preletu civilných lietadiel, boli zaradené krajiny ako Sýria, Jemen, Libanon, Líbya a Ukrajina. Druhá úroveň zahŕňala krajiny s čiastočnými varovaniami, medzi ktoré patrili Irán, Irak, Afganistan, Izrael a Rusko. Tretia úroveň predstavovala krajiny, kde bola odporúčaná zvýšená opatrnosť, hoci neboli vydané rozsiahle varovania.

V rámci prijatých opatrení boli v mnohých krajinách zavedené úplné alebo čiastočné zákazy preletov civilných lietadiel nad rizikovými zónami, vydávali sa výstrahy pre letecké spoločnosti a upravovali sa letové trasy tak, aby sa minimalizovalo riziko kontaktu s vojenskými operáciami. Zvýšené monitorovanie vzdušného priestoru bolo realizované posilnením radarového pokrytia a spoluprácou s vojenskými zložkami. Napríklad Federálny letecký úrad Spojených štátov amerických (FAA) predĺžil obmedzenia letov nad Irakom až do roku 2027 z dôvodu pretrvávajúcich bezpečnostných hrozieb.

Medzinárodné organizácie, ako Organizácia spojených národov (OSN), vyzvali na zavedenie jasných štandardov na ochranu civilných lietadiel nad konfliktmi, čo bolo motivované tragickými incidentmi, ako zostrelenie letu MH17 nad Ukrajinou a letu PS752 nad Iránom. Boli navrhnuté opatrenia zahŕňajúce povinnosť leteckých dopravcov vykonávať hodnotenie rizík a informovať cestujúcich o potenciálnych nebezpečenstvách. Zdôraznená bola aj potreba medzinárodnej spolupráce a výmeny informácií na minimalizovanie rizík pre civilnú leteckú dopravu.

Ekonomické dôsledky prijatých opatrení boli významné. Uzatvorenie vzdušného priestoru spôsobilo zvýšenie prevádzkových nákladov leteckých spoločností v dôsledku dlhších letových trás a vyššej spotreby paliva. Vplyv na príjmy z leteckých poplatkov, cestovný ruch a obchodnú aktivitu bol negatívny, čo sa prejavilo najmä v krajinách ako Ukrajina a v regióne Blízkeho východu. V Rusku boli vojenské aktivity sprevádzané sankciami, ktoré ovplyvnili ekonomiku, najmä export energií, čo viedlo k snahám o diverzifikáciu hospodárstva a investície do vnútroštátnych projektov.

Z uvedeného vyplýva, že vojenské nepokoje a politické konflikty výrazne ovplyvnili bezpečnosť a ekonomiku leteckej dopravy v postihnutých regiónoch. Prijaté opatrenia boli nevyhnutné na zabezpečenie ochrany civilných lietadiel, avšak ich dôsledky sa prejavili v oblasti prevádzkových nákladov, kapacity letísk a dôvery cestujúcich. Situácia si vyžaduje neustále monitorovanie, flexibilitu v plánovaní letov a medzinárodnú spoluprácu s cieľom minimalizovať negatívne dopady na globálnu leteckú dopravu.

4. Dopad prijatých opatrení vo vzdušnom priestore na trh leteckej dopravy

Táto časť výskumu sa zameriavala na analýzu širších ekonomických a prevádzkových dopadov opatrení zavedených v dôsledku vojenských konfliktov. Tieto opatrenia zahŕňali uzatváranie alebo obmedzovanie vzdušného priestoru, presmerovanie letových trás a zvýšené bezpečnostné kontroly, ktoré mali za cieľ minimalizovať riziká pre civilné lietadlá a zároveň zabezpečiť plynulosť prevádzky. V dôsledku týchto zmien boli letecké spoločnosti nútené prispôbiť svoju prevádzku, čo sa prejavilo v predĺžení letových trás, zvýšení nákladov na palivo a prevádzku, ako aj v zmenách v konkurenčnom prostredí globálneho leteckého trhu.

Vzdušné priestory krajín ako Ukrajina, Rusko a niektoré štáty Blízkeho východu boli najviac postihnuté obmedzeniami. Nad Ukrajinou bol vzdušný priestor uzavretý pre civilné lety po vypuknutí konfliktu, čo viedlo k presmerovaniu letov cez susedné krajiny a zvýšeniu prevádzkových nákladov leteckých spoločností. Podobné opatrenia boli prijaté aj v oblastiach Blízkeho východu, kde vojenské napätie a konflikty spôsobili rušenie letov, meškania a zvýšenú neistotu medzi cestujúcimi. V dôsledku týchto opatrení bol zaznamenaný pokles dopytu po leteckej doprave v niektorých regiónoch, čo negatívne ovplyvnilo cestovný ruch a príjmy leteckých spoločností.

Ekonomické dôsledky prijatých opatrení sa prejavili vo viacerých oblastiach. Zvýšenie prevádzkových nákladov bolo spôsobené predĺžením letových trás a vyššou spotrebou paliva, čo malo za následok rast cien leteniek. Letecké spoločnosti boli vystavené aj vyšším nákladom na bezpečnostné opatrenia a údržbu flotíl, najmä v dôsledku narušenia dodávateľských reťazcov a obmedzení v prístupe k náhradným dielom. Okrem toho boli zaznamenané straty z dôvodu zníženia kapacity letov do rizikových oblastí a zníženia dôvery cestujúcich v bezpečnosť leteckej dopravy. Niektoré letecké spoločnosti, napríklad v Rusku, čelili uzemneniu lietadiel kvôli zastaveniu dodávok dielov a technickej podpory zo západných krajín.

Globálny trh leteckej dopravy bol zároveň ovplyvnený geopolitickými faktormi, ktoré spôsobili narušenie dodávateľských reťazcov a zvýšenie cien komodít, najmä ropy. Tento vývoj viedol k rastu inflácie a sprísneniu menovej politiky, čo malo za následok spomalenie hospodárskeho rastu a zníženie kúpnej sily cestujúcich. V dôsledku toho sa očakáva mierne zníženie dopytu po leteckej doprave v krátkodobom horizonte, hoci Medzinárodná asociácia leteckých dopravcov (IATA) predpokladá pokračujúci rast sektora s výhľadom na rok 2026 a ďalšie roky.

V oblasti leteckej nákladnej dopravy boli zaznamenané podobné výzvy. Narušenie dodávateľských reťazcov, colné bariéry a obchodné obmedzenia spôsobili zvýšenie nákladov a predĺženie dodacích lehôt, čo ovplyvnilo plynulosť prepravy tovarov.

Napriek týmto problémom zostala letecká nákladná doprava kľúčovým prvkom globálneho obchodu, pričom regióny Ázie a Pacifiku zaznamenali najvyšší rast dopytu. V januári 2025 však došlo k spomaleniu rastu trhu leteckej nákladnej dopravy, ktoré bolo pripisované neistote vyplývajúcej z pretrvávajúcich obchodných napätí a globálnych ekonomických výkyvov.

Z uvedeného vyplýva, že vojenské konflikty a s nimi súvisiace regulačné opatrenia vo vzdušných priestoroch významne ovplyvnili globálny trh leteckej dopravy. Prevádzka leteckých spoločností bola prispôbovaná novým podmienkam, pričom boli zaznamenané zvýšené náklady, zmeny v letových trasách a zníženie dopytu v niektorých regiónoch. Tieto faktory spôsobili narušenie cestovného ruchu a logistických reťazcov, ktoré si vyžadujú neustálu pozornosť a koordinovanú medzinárodnú spoluprácu na minimalizáciu negatívnych dopadov a zabezpečenie udržateľnosti leteckej dopravy v budúcnosti.

5. Analýza uvalených sankcií na vybrané krajiny a ich dopad

Vojenské konflikty a politické nepokoje boli v posledných rokoch riešené medzinárodným spoločenstvom prostredníctvom sankcií, ktoré majú zásadný vplyv na leteckú dopravu z hľadiska bezpečnosti, regulácií a ekonomických obmedzení. Cieľom týchto sankcií je obmedziť financovanie konfliktov, vyvíjať politický tlak na zainteresované strany a chrániť civilné letectvo. Efektívnosť aplikovaných sankcií je analyzovaná na základe skúmania sankčných opatrení uložených jednotlivými štátmi, regionálnymi organizáciami ako EÚ, a globálnymi inštitúciami ako OSN. Účinnosť týchto opatrení je posudzovaná prostredníctvom identifikácie najlepšie aplikovaných sankčných mechanizmov a diskusie ich dôsledkov na globálnu leteckú dopravu.

Medzi najúspešnejšie sankcie v leteckej doprave, ktorých cieľom je znížovanie rizík v nestabilných krajinách, je zaraďovaná kombinácia regulačných opatrení EÚ, ekonomických stimulov pre dekarbonizáciu a priamych obmedzení prevádzky. Tieto sankcie sú často namierené proti vládam krajín mimo EÚ, subjektom, skupinám, organizáciám a jednotlivcom. Pri navrhovaní sankcií je zo strany EÚ kladený dôraz na minimalizáciu nepriaznivých dôsledkov na subjekty a osoby, ktoré nie sú zodpovedné za politiky vedúce k prijatiu sankcií, s cieľom obmedziť vplyv na civilné obyvateľstvo. Medzi najefektívnejšie sankcie sa zaraďuje úplné uzavretie vzdušného priestoru, uzatvorenie vzdušného priestoru nad konfliktnými oblasťami, zákaz prenájmu alebo predaja lietadiel a cielené sankcie proti leteckým spoločnostiam spolupracujúcimi pri konfliktoch.

V roku 2022 boli voči Ruskej federácii uvalené rozsiahle sankcie západnými krajinami ako reakcia na inváziu na Ukrajinu. Tieto opatrenia zahŕňali zákaz ruským leteckým spoločnostiam využívať vzdušný priestor mnohých krajín, obmedzenia v dodávkach náhradných dielov a zákaz leasingu lietadiel. Z ekonomického hľadiska majú sankcie rozsiahly vplyv, pričom ruské letecké spoločnosti boli závislé na leasingu lietadiel od západných spoločností. Po zavedení sankcií museli tieto firmy ukončiť kontrakty, čo viedlo k strate väčšiny flotily ruských spoločností. Obmedzenie prístupu k náhradným dielom a údržbe má významný dopad na bezpečnosť ruských lietadiel. Sankcie v oblasti letectva slúžia ako nástroj medzinárodného

nátlaku na Rusko s cieľom oslabiť jeho ekonomiku a obmedziť vojenské kapacity.

Irán bol v posledných desaťročiach vystavený zložitému systému medzinárodných sankcií, ktorých hlavným cieľom je obmedziť jeho jadrové ambície, zamedziť rozvoju balistického raketového programu a riešiť obavy týkajúce sa porušovania ľudských práv a podpory organizácií označených za teroristické. Tieto sankcie uvalili rôzne subjekty, vrátane Spojených štátov amerických, Európskej únie a Organizácie Spojených národov, pričom každá z nich má vlastné ciele a opatrenia.

Sankcie v leteckom sektore majú síce za následok vytváranie tlaku na sankcionované štáty, no ich efektívnosť je obmedzená nepriamymi dôsledkami. Hoci sa štáty snažia adaptovať prostredníctvom štátnej podpory a paralelných dodávateľských reťazcov, dlhodobé obmedzenia spôsobujú oslabenie ich leteckých odvetví. Politicky sankcie posilňujú medzinárodnú izoláciu, no ich úspech závisí od koordinácie medzi západnými spojencami a tretími krajinami.

6. Metodika práce

Práca bola vypracovaná na základe komplexného metodologického prístupu, ktorý kombinoval rešerše relevantnej literatúry, analýzu súčasného stavu, komparáciu rôznych prístupov a návrh vlastných opatrení. Cieľom bolo vytvoriť komplexný a ucelený obraz o problematike a navrhnúť praktické a realizovateľné opatrenia na minimalizáciu dopadov konfliktov na civilnú leteckú dopravu.

Na úvod bola vykonaná rozsiahla rešerš dostupnej literatúry, ktorá zahŕňala akademické štúdie, odborné články, správy medzinárodných organizácií (ICAO, EASA, IATA), vládne dokumenty, ako aj spravodajských a bezpečnostných zdrojov o rizikách v konfliktných zónach. Cieľom bolo získať komplexný prehľad o problematike, identifikovať kľúčové trendy a faktory ovplyvňujúce civilné letectvo v konfliktných zónach.

Druhou fázou bola analýza súčasného stavu, v ktorej sa sústreďovala pozornosť na identifikáciu aktuálnych konfliktov (napr. Ukrajina, Sýria, Sudán, Izrael-Palestína) a ich konkrétne dôsledky na leteckú prevádzku. Pracovalo sa s dátami o uzatvorených vzdušných priestoroch, presmerovaniach letov a reakciách dopravcov a štátov. V rámci rešerše boli analyzované dostupné dáta a štatistiky o ekonomických dopadoch konfliktov na letecké spoločnosti a leteckú dopravu.

Analýzovala sa účinnosť medzinárodných sankcií uvalených na štáty zapojené do ozbrojených konfliktov, a to z hľadiska ich vplyvu na bezpečnosť civilného letectva, politický tlak, ekonomickú stabilitu a fungovanie leteckých spoločností, napr. v prípade Ruska a Iránu.

Tieto dáta boli získavané z otvorených zdrojov, ako aj zo správ medzinárodných organizácií a vládnych agentúr. Rovnako tak boli identifikované geografické oblasti, ktoré sú najviac postihnuté vojenskými konfliktmi a politickými nepokojmi. Tieto oblasti boli následne podrobené detailnejšej analýze.

Súčasťou spracovania bola použitá aj metóda komparácie, kde boli analyzované prístupy jednotlivých štátov (napr. Ukrajina, Rusko, Izrael) k riadeniu rizík v civilnom letectve počas konfliktov. Zameranie bolo na opatrenia prijaté v ich vzdušnom

priestore, ako sú uzatvorenia vzdušného priestoru, obmedzenia letových trás a zvýšené bezpečnostné kontroly.

Bola vykonaná komparácia postupov a odporúčaní medzinárodných organizácií (ICAO, EASA) v oblasti bezpečnosti civilného letectva v konfliktných zónach. Cieľom bolo zistiť, aké štandardy a postupy sa uplatňujú na medzinárodnej úrovni a ako sú implementované v praxi.

V záverečnej časti je obsiahnutý možný návrh efektívnych opatrení, ktorých cieľom je zvýšiť odolnosť civilného letectva voči destabilizačným faktorom. Návrhy zahŕňajú diplomatické iniciatívy, technologické a operačné inovácie, ako aj posilnenie medzinárodnej spolupráce a výmeny informácií o rizikách spojených s nepokojmi.

7. Návrh možných opatrení minimalizujúcich dopad na leteckú dopravu

Na základe analýz krajín významne zasiahnutých vojenskými konfliktmi (Rusko, Ukrajina, štáty Blízkeho východu) a prijatých opatrení v ich vzdušných priestoroch, sa potvrdzuje citlivosť leteckej dopravy na bezpečnostné riziká. Výskumom boli identifikované ekonomické dôsledky, obmedzenia v prevádzke a dopad na logistické reťazce.

Analýzovala sa účinnosť sankcií voči štátom zapojeným do konfliktov (Rusko, Irán) z hľadiska bezpečnosti civilného letectva, politického tlaku a ekonomickej stability. Výsledky slúžia ako základ pre návrhy opatrení na znižovanie dopadov ozbrojených konfliktov na leteckú dopravu.

Expert OSN pre ľudské práva zdôraznil nedostatočnosť medzinárodných predpisov pre bezpečnosť lietadiel nad konfliktnými zónami. Potrebné je vytvoriť jednoznačné pravidlá pre leteckých dopravcov, zahrnúť posúdenie rizík do plánovania letov a informovať cestujúcich o potenciálnych rizikách. Zintenzívnenie medzinárodnej spolupráce a zdieľania informácií je nevyhnutné.

V tejto časti sa navrhujú efektívne opatrenia, ktoré reflektujú potrebu koordinovaného prístupu, posilnenia bezpečnostných protokolov, rozvoja mechanizmov včasného varovania a zvýšenia adaptability leteckého sektora voči geopolitickým udalostiam. Tieto opatrenia boli vypracované s prihliadnutím na existujúce poznatky a identifikované slabé miesta v reakciách na krízové situácie v civilnom letectve.

7.1. Politicko-diplomatické riešenia

S ohľadom na narastajúce geopolitické napätie a čoraz častejšie ozbrojené konflikty sa javí ako nevyhnutné posilnenie politických a diplomatických mechanizmov, ktoré by boli schopné reagovať na riziká pre civilné letectvo v konfliktných zónach. Jedným z kľúčových krokov je zintenzívnenie spolupráce medzi štátmi, leteckými spoločnosťami a medzinárodnými organizáciami s cieľom koordinovať bezpečnostné opatrenia a reagovať na nepredvídateľné hrozby.

V oblasti politických a diplomatických riešení je jedným z návrhov posilnenie existujúcich multilaterálnych dohôd a vytvorenie nových medzinárodných protokolov, ktoré by jasne upravovali pravidlá civilných preletov nad rizikovými a konfliktnými oblasťami. Bolo odporúčané, aby sa štáty v prípade zhoršujúcej sa bezpečnostnej situácie zaviazali k pravidelnému a

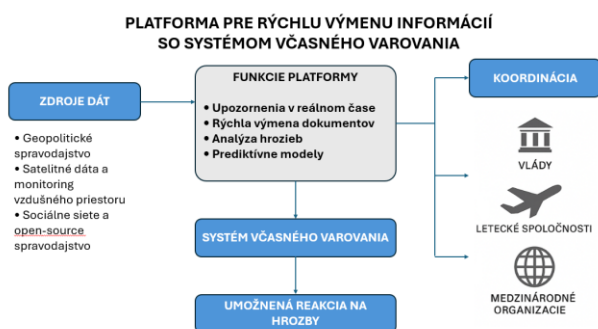
transparentnému zdieľaniu informácií o hrozbách vo svojom vzdušnom priestore. V súčasnosti neexistuje jednotný, právne záväzný rámec, ktorý by štáty a leteckí dopravcovia museli dodržiavať pri rozhodovaní o využívaní vzdušného priestoru nad nestabilnými regiónmi. Odporúčania vydávané organizáciami ako ICAO či EASA sú síce smerodajné, no často majú len odporúčací charakter a nepostačujú na zabezpečenie jednotnej reakcie na vzniknuté hrozby.

Navrhované riešenie preto spočíva v prijatí záväzného protokolu pod záštitou ICAO, ktorý by vymedzoval tri základné oblasti: povinnosť zatvoriť vzdušný priestor nad aktívnymi bojovými zónami alebo oblasťami s vysokým rizikom ozbrojeného konfliktu, transparentnú a jednotnú klasifikáciu rizika podľa závažnosti konfliktu, pričom by sa určila miera obmedzenia a zavedenie mechanizmu koordinovaného informovania prostredníctvom centrálneho systému výmeny dát.

S tým súvisí aj zavedenie štandardizovaných diplomatických protokolov pre urýchlenú komunikáciu medzi štátmi v prípade krízových situácií, ktoré by mohli ohroziť bezpečnosť civilného letectva. Cieľom je zaručiť, že informácie o zatvorení vzdušného priestoru, zmene bezpečnostných podmienok alebo potrebe odkloniť trasy budú šírené okamžite a koordinovane.

Ďalším opatrením bolo odporúčané vytvorenie medzinárodného diplomatického krízového výboru pre oblasť civilného letectva, ktorý by v prípade eskalujúcich konfliktov mohol rýchlo vydať koordinované odporúčania o uzavretí vzdušného priestoru alebo presmerovaní letov, čím by sa zabránilo nekoordinovaným a oneskoreným rozhodnutiam jednotlivých krajín.

Na zabezpečenie koordinácie vyššie spomenutých multilaterálnych dohôd a medzinárodných protokolov by bolo vhodné vytvoriť platformu pre rýchlu výmenu informácií medzi vládami, leteckými dopravcami a medzinárodnými organizáciami na efektívnu reakciu na hrozby.



Obrázok 1: Teoretický návrh platformy
Zdroj: autor

7.2. Technologické a operačné riešenia

Rovnako ako politické a diplomatické riešenia, tak aj technológia zohráva kľúčovú úlohu pri minimalizovaní rizík v konfliktných zónach. Zlepšenie existujúcich systémov, implementácia nových technologických riešení a modernizácia operačných postupov sú nevyhnutné pre zníženie rizika, ktoré hrozí civilným lietadlám prelietajúcim cez konfliktné oblasti.

Z technologického hľadiska bola ako priorita identifikovaná potreba zavedenia inteligentných monitorovacích systémov,

ktoré by mohli prostredníctvom satelitného snímkovania a spracovania veľkých dát v reálnom čase sledovať vývoj vojenských operácií v blízkosti letových trás. Tieto systémy by mohli byť integrované do plánovania letov, čím by sa dopravcom umožnilo flexibilnejšie reagovať na vznikajúce hrozby. Letecké spoločnosti musia pred plánovaným preletom nad potenciálne nebezpečnou oblasťou vykonať detailnú analýzu, ktorá zohľadňuje nielen aktuálnu geopolitickú situáciu, ale aj vojenské pohyby, diplomatické napätie, meteorologické podmienky či domáce nepokoje. Kľúčovým dokumentom pre tento proces je ICAO Risk Assessment Manual – Document 10084.

Ďalším prvkom návrhu bola aj potreba zavedenia jednotných protokolov pre plánovanie alternatívnych trás, ktoré by boli pravidelne aktualizované v súlade s bezpečnostnými mapami a výstrahami od organizácií ako EASA, FAA alebo Eurocontrol. Týmto spôsobom by sa minimalizovalo riziko, že dopravca preletí nad nebezpečnou oblasťou bez dostatočnej informovanosti.

Z prevádzkového pohľadu bolo odporúčané preškoliť posádky lietadiel na zvládanie krízových situácií špecifických pre prelet nad konfliktnými oblasťami. Špeciálny výcvik by mal zahŕňať napríklad postupy pri náhlých zmenách trasy, komunikáciu s riadiacimi strediskami pri výpadkoch alebo simulácie incidentov spojených s ozbrojenými hrozbami na zemi či vo vzduchu.

Dôležitú úlohu pri predchádzaní rizikám zohráva aj využitie moderných technológií, predovšetkým umelej inteligencie a prediktívnych algoritmov. Tieto systémy dokážu v reálnom čase spracovávať dáta z rôznych zdrojov a identifikovať vznikajúce hrozby ešte pred ich vypuknutím.

Tretím opatrením je zvýšenie flexibility letových trás a modernizácia flotíl. Letecké spoločnosti musia byť schopné promptne reagovať na zhoršujúcu sa bezpečnostnú situáciu v jednotlivých regiónoch. Dôležitá je aj transparentnosť a dôvera voči cestujúcim, ktorí by mali byť včas informovaní o potenciálnych rizikách na trase svojho letu a mať možnosť výberu.

7.3. Spolupráca medzinárodných organizácií

V oblasti medzinárodnej spolupráce bolo navrhnuté vytvorenie centralizovanej digitálnej databázy rizík, do ktorej by mohli prispievať štáty, leteckí dopravcovia, spravodajské agentúry a regulačné orgány. Táto databáza by bola spravovaná organizáciou ako ICAO alebo IATA a slúžila by na rýchlu výmenu informácií o aktuálnych hrozbách v konkrétnych vzdušných priestoroch.

Bola taktiež zdôraznená potreba zjednotenia kritérií hodnotenia bezpečnosti vzdušného priestoru, keďže v súčasnosti niektoré krajiny uzatvárajú svoj vzdušný priestor rýchlejšie než iné, čo môže viesť k nejednotnému prístupu. Zavedením harmonizovaných štandardov by sa dosiahla väčšia konzistencia v reakciách na vznikajúce riziká.

Ďalší návrh smeroval k posilneniu úlohy organizácií (ICAO, IATA, Eurocontrol) a podobných inštitúcií pri koordinácii zmeny trás letov – najmä v prípadoch, keď je nutné operatívne presmerovať veľký počet lietadiel kvôli náhlej eskalácii konfliktu. V tomto kontexte bolo odporúčané, aby sa organizovali pravidelné krízové cvičenia a scenárové simulácie, ktorých cieľom je zvýšiť

prípravenosť letových prevádzkovateľov, dispečerov a štátnych orgánov na nepredvídateľné situácie.

S cieľom zabezpečiť čo najefektívnejšiu ochranu cestujúcich je zároveň potrebné zlepšiť koordináciu medzi štátmi a leteckými dopravcami, a to najmä pri náhlom vypuknutí konfliktu alebo pri eskalácii napätia v konkrétnom regióne. V oblasti informovania je žiaduce vytvoriť prehľadné a verejne dostupné digitálne mapy rizikových oblastí, ktoré by boli aktualizované a dostupné nielen pre odborníkov, ale aj pre samotných cestujúcich.

Navrhnuté opatrenia vychádzajú z potreby znížiť zraniteľnosť civilného letectva v čase zvýšeného geopolitického napätia. Ich implementáciou by sa nielen znížilo riziko strát na životoch a majetku, ale aj zabezpečila vyššia stabilita a odolnosť celého odvetvia letectva. Kľúčovým predpokladom ich úspechu zostáva politická vôľa, technologická prípravenosť a medzinárodná solidarita.

8. Záver

Na základe spracovaných analýz možno vyvodiť niekoľko zásadných záverov týkajúcich sa dopadov vojenských konfliktov a politických nepokojov na leteckú dopravu. Tieto javy predstavujú komplexnú a mnohostrannú hrozbu, ktorá zasahuje do rôznych aspektov leteckej prevádzky, bezpečnosti a ekonomiky.

Predovšetkým je zrejmé, že moderné ozbrojené konflikty už nie sú len lokálnymi udalosťami, ale majú globálny dosah, ktorý ovplyvňuje aj krajiny, ktoré nie sú priamo zapojené do bojov. Uzatváranie vzdušného priestoru, presmerovania letov, zvýšené bezpečnostné opatrenia a narušenie dodávateľských reťazcov spôsobujú značné finančné straty leteckým spoločnostiam, zvyšujú náklady na cestovanie a znižujú dopyt po leteckej doprave.

Analýza vybraných krajín (Ukrajina, štáty Blízkeho východu, Rusko) poukazuje na rôzne prístupy k riešeniu krízových situácií v leteckej doprave. Niektoré štáty sa rozhodli pre úplné uzatvorenie vzdušného priestoru, iné pre čiastočné obmedzenia alebo zvýšené bezpečnostné kontroly. Tieto opatrenia majú vplyv na trh leteckej dopravy, pričom letecké spoločnosti sú nútené prispôbiť svoje prevádzkové plány a hľadať alternatívne trasy.

Uvalené sankcie na krajiny zapojené do ozbrojených konfliktov majú taktiež komplexný dopad na civilné letectvo. Hoci cieľom sankcií je obmedziť financovanie konfliktov a vyvíjať politický tlak, často vedú k narušeniu leteckej prevádzky, obmedzeniu prístupu k náhradným dielom a ohrozeniu bezpečnosti letov. Je preto dôležité, aby boli sankcie cielené a aby sa minimalizovali ich negatívne dôsledky na civilné obyvateľstvo.

Vzhľadom na zložitú a rozsiahly dopad vojenských konfliktov na civilnú leteckú dopravu je nevyhnutná úzka spolupráca medzi štátmi, medzinárodnými organizáciami a leteckými spoločnosťami. Dôležité je vytvoriť jednotný systém hodnotenia rizík, zdieľať informácie a koordinovať opatrenia na zabezpečenie bezpečnosti civilných letov. Zároveň je potrebné investovať do vývoja nových technológií a operačných postupov, ktoré umožnia flexibilnú reakciu na meniace sa bezpečnostné prostredie. Napokon, transparentné informovanie cestujúcich o potenciálnych rizikách je nevyhnutnou súčasťou zodpovedného prístupu k riadeniu bezpečnosti v civilnom letectve.

Výskum potvrdzuje, že v súčasnom geopolitickom prostredí je bezpečnosť civilnej leteckej dopravy čoraz viac závislá od schopnosti štátov a organizácií predvídať, analyzovať a včas reagovať na riziká spojené s ozbrojenými konfliktmi. Poukazuje na to, že civilné letectvo nie je izolovaným systémom, ale citlivo reaguje na vonkajšie bezpečnostné a politické prostredie. Odolnosť letectva voči týmto výzvam závisí od dobre nastavenej spolupráce medzi štátmi, regulátormi a samotnými leteckými spoločnosťami.

Referencie

1. International Civil Aviation Organization. *Conflict Zones*. [online]. Dostupné na: <https://www.icao.int/safety/ConflictZones/Pages/default.aspx>
2. Council of the European Union. *Pozícia EÚ v súvislosti so situáciou na Blízkom východe*. [online]. Dostupné na: <https://www.consilium.europa.eu/sk/policies/eu-position-situation-middle-east/>
3. U.S. Department of State. *Country Reports on Terrorism 2023 – Afghanistan*. [online]. Dostupné na: <https://2021-2025.state.gov/reports/country-reports-on-terrorism-2023/afghanistan>
4. European Union Aviation Safety Agency. *Information on Conflict Zones*. [online]. Dostupné na: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/air-operations/information-on-conflict-zones>
5. REUTERS. *Airlines suspend flights as Middle East tensions rise*. [online]. 2024-08-08 Dostupné na: <https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/airlines-suspend-flights-middle-east-tensions-rise-2024-08-08/>
6. Hospodárske noviny. *Konflikt na Blízkom východe vplýva na aerolinky: lety naberajú meškania*. [online]. Dostupné na: <https://hnonline.sk/svet/96172249-konflikt-na-blizkom-vychode-vplyva-na-aerolinky-lety-naberaju-meskania>
7. OPSGROUP. *Safe Airspace: Conflict Zone Risk Summary*. [online]. Dostupné na: <https://safeairspace.net/summary/>
8. United Nations Human Rights Office of the High Commissioner. *UN expert calls for clear, unambiguous standards to protect aircraft over conflict zones*. [online]. 2021-01 Dostupné na: <https://www.ohchr.org/en/press-releases/2021/01/un-expert-calls-clear-unambiguous-standards-protect-aircraft-over-conflict>
9. Ministerstvo hospodárstva SR. *Sankcie voči Rusku a Bielorusku*. [online]. Dostupné na: <https://www.economy.gov.sk/obchod/sankcie-voci-rusku-a-bielorusku>
10. Investment Monitor. *Russia-Ukraine conflict: Aviation sector impact*. [online]. Dostupné na: <https://www.investmentmonitor.ai/special-focus/ukraine-crisis/russia-ukraine-conflict-aviation-sector-impact/>
11. Občianski demokrati Slovenska. *Ako vojna na Ukrajine posilnila čínske letecké monopoly a oslabila Európu*. [online]. Dostupné na: <https://www.ods.sk/media/ako-vojna-na-ukrajine-posilnila-cinske-letecke-monopoly-a-oslabila-europu/>

12. International Air Transport Association. *How Would a Global Trade War Affect Aviation?* [online]. Dostupné na: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/how-would-a-global-trade-war-affect-aviation/>
13. Cargo Airports & Airline Services. *Global air cargo growth slows in January amid trade war uncertainty.* [online]. Dostupné na: <https://caasint.com/global-air-cargo-growth-slows-in-january-amid-trade-war-uncertainty/>
14. REUTERS. *EU says unconditional withdrawal of Russia from Ukraine is precondition to amend sanctions.* [online]. 2025-03-26 Dostupné na: <https://www.reuters.com/world/europe/eu-says-unconditional-withdrawal-russia-ukraine-is-precondition-amend-sanctions-2025-03-26/>
15. SciSpace. *Spillover effects of sanctions on airlines.* [online]. Dostupné na: <https://scispace.com/papers/spillover-effects-of-sanctions-on-airlines-blxels03d8>
16. TASR. *V Egypte sa začali rokovania o druhej fáze prímeria.* Teraz.sk. [online]. Dostupné na: <https://www.teraz.sk/zahranicie/v-egypte-sa-zacali-rokovania-o-druhej-f/859966-clanok.html>
17. TASR. *Európski lídri po summite v Londýne prijali spoločné vyhlásenie.* Teraz.sk. [online]. Dostupné na: <https://www.teraz.sk/spravy/europski-lidri-po-summite-v-londyne-p/860533-clanok.html>



ANALÝZA SYSTÉMU SPOPLATNENIA LETECKÝCH NAVIGAČNÝCH SLUŽIEB

Michal Granát

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Matúš Materna

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Radoslava Nichtová

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The goal of this thesis is to analyse the system of air navigation charges of air navigation service providers in Europe. The thesis explains the role of charging system, describes reasons why it was necessary to implement this system, analyses individual phases of its implementation and examine current charging schemes. The methodology of this thesis uses a synthesis of theoretical knowledge, a comprehensive development of the analysis in charging scheme, an analysis of current charging scheme a comparison of different implementation phases and an evaluation of differences between phases. Thesis analyses methods of route and terminal charges calculations, unit rates and cost effectiveness of air navigation services providers in each phase. The outcome of this thesis is a summary of four development phases analysis, highlighting differences between methods of charges calculations, differences in cost-effectiveness of providers in Europe and differences in regulations.

Keywords

navigation services, analysis. charges. development. comparison

1. Úvod

Cieľom tejto práce je vytvorenie analýzy systému spoplatňovania leteckých navigačných služieb (ďalej len „LNS“) v Európe od začiatku harmonizácie až do súčasnej doby. Poskytovatelia LNS predstavujú neoddeliteľnú súčasť zabezpečenia efektívnej, plynulej a bezpečnej letovej prevádzky. Zvyšovanie hustoty letovej prevádzky v európskom vzdušnom priestore zvyšovalo tlak na poskytovateľov LNS, aby zaručili vysokú úroveň bezpečnosti, plynulosti a efektivity letovej prevádzky. Problémom pre plynulosť a efektívne riadenie letovej prevádzky, bola fragmentácia európskeho vzdušného priestoru a komplikované spoplatňovanie LNS (Európsky parlament, 2015). Preto vznikla potreba zavedenia spoločného systému spoplatnenia v Európe.

Práca sa zameriava na komplexnú analýzu jednotlivých fáz zavádzania spoločného systému spoplatňovania LNS, analyzuje súčasný systém a výsledkom je zhodnotenie a komparácia rozdielov medzi jednotlivými fázami zavádzania spoločného systému spoplatňovania LNS v Európe. Na začiatku sa práca venuje syntéze teoretických poznatkov o poskytovateľoch LNS. Opisuje štruktúru LNS, vnútornú organizáciu poskytovateľov, nákladovú charakteristiku, dopyt po službách poskytovateľov a náklady na poskytovanie LNS.

Spoločný systém spoplatňovania sa zavádzal v štyroch fázach, ktoré sú predmetom komplexnej analýzy tejto práce. Analýza sa týkala metód určovania traťových a terminálnych poplatkov, jednotkových sadzieb a nákladovej efektívnosti poskytovateľov LNS v Európe z údajov Európskej únie a Eurocontrolu. Súčasný systém spoplatnenia predstavuje zatiaľ posledný vývojový stupeň spoločného systému spoplatňovania, ktorý sa taktiež stal predmetom analýzy v tejto práci.

Výsledkom práce je zhrnutie výsledkov analýzy jednotlivých fáz zavádzania systému spoplatňovania, porovnanie rozdielov medzi týmito fázami a poukázalo sa na niektoré nedostatky tohto systému.

2. Metodika a metódy skúmania

V metodike práce sa použila syntéza teoretických poznatkov o poskytovateľoch LNS, komplexná analýza vývoja systému spoplatňovania, kde sa analyzovali štyri fázy vývoja systému spoplatňovania a cez rozbor nariadení Európskej únie popísali pravidlá stanovené pre jednotlivé fázy. Analyzoval sa súčasný systém spoplatňovania a vytvorila sa komparácia jednotlivých fáz zavádzania systému s následným zhodnotením výsledkov analýzy a rozdielov.

3. Výsledky

Prvá fáza zavádzania spoločného systému spoplatnenia v Európe priniesla harmonizáciu systému vyberania traťových a terminálnych poplatkov (Materna a Novák Sedláčková, 2022). Jednotky traťových služieb sa určovali harmonizovaním vo všetkých členských krajinách. Pre jednotky terminálnych služieb bolo harmonizovanie len čiastočné. Dôvodom bol terminálny exponent, dôležitý pre výpočet faktora hmotnosti a následne terminálneho poplatku. Terminálny exponent bol vybraný členským štátom a mohol nadobúdať hodnoty v intervale od 0,5 do 0,9. Ďalším dôvodom nižšej harmonizácie bola možnosť pre členské štáty neuplatňovať spoločný systém spoplatnenia na letiská s menej než 50 000 pohybmi komerčnej leteckej dopravy ročne (Tomová a Havel, 2015). Na určenie jednotkovej sadzby sa používala metóda úplného pokrytia nákladov, ktorá ale nevedla poskytovateľov LNS k nákladovej efektívnosti, ktorá je kľúčová na určenie cien služieb (Materna a Novák Sedláčková, 2022). Náklady a množstvo služieb sa určovali na základe prognóz a výnosy generované poplatkami sa tak nemuseli rovnať skutočným nákladom na LNS (Tomová a Havel, 2015). Rozdiel pri nesprávnom odhade nákladov alebo objemu prevádzky sa preniesol na ceny LNS pre používateľov vzdušného priestoru (Materna a Novák Sedláčková, 2022). Výhoda tejto metódy bola v tom, že zabezpečovala finančnú stabilitu poskytovateľov LNS a v prípade efektívneho riadenia nákladov boli beneficiármi používatelia vzdušného priestoru (Tomová a Havel, 2015).

Druhá fáza zavádzania spoločného systému spoplatnenia znamenala začiatok prvého referenčného obdobia (RP1) Jednotného európskeho neba. Zaviedol sa spoločný systém riadenia poskytovateľov LNS podľa výkonu a stanovili sa ciele v oblasti nákladovej efektivity (Tomová a Havel, 2015). Druhá fáza riešila zlepšenie nákladovej efektívnosti poskytovateľov LNS. Zaviedol sa systém stanovených nákladov, v ktorom sa náklady stanovili v plánoch výkonnosti na každý rok referenčného obdobia. Metóda výpočtu traťových poplatkov sa nezmenila. Harmonizácia traťových služieb bola naďalej nižšia než harmonizácia terminálnych služieb. Členské štáty si naďalej sami určovali exponent pri výpočte faktora hmotnosti v intervale od 0,5 do 0,9. Ostala aj možnosť neuplatňovania spoločného systému spoplatnenia pre letiská s menej ako 50 000 IFR letmi za rok. Metóda výpočtu terminálnych poplatkov ostala rovnaká. Zásadná zmena sa stala v metóde stanovenia jednotkových sadzieb, ktorá sa už neurčovala na základe prognózovaných nákladov, ale na základe stanovených nákladov (Tomová a Havel, 2015). Do výpočtu sa pridali aj korekčné položky do ktorých sa zabudoval mechanizmus zdieľania rizika. Tento mechanizmus mal motivovať poskytovateľov LNS k nákladovej efektívnosti tým, že časť zisku nemuseli prenášať na používateľov LNS znížením cien jednotkovej sadzby a na druhej strane, pri neefektívnom riadení nákladov, nemožnosťou prenosu strát do ďalších rokov (Materna a Novák Sedláčková, 2022). Pre porovnanie, v metóde úplného pokrytia nákladov dochádzalo k prenosu celej čiastky strát do ceny. Metóda stanovených nákladov a systém zdieľania rizika zabezpečoval symetrickejšie rozloženie deficitu medzi poskytovateľov LNS a používateľov vzdušného priestoru podľa dohodnutých pravidiel (Tomová a Havel, 2015). Orgán na hodnotenie výkonnosti Performance Review Body, ktorý je poradným orgánom Európskej komisie a pomáha pri implementácii systému výkonnosti a spoplatňovania Jednotného európskeho neba, analyzoval údaje týkajúce sa stanovených cieľov na úrovni Únie, agregované údaje z prijatých národných výkonnostných plánov a skutočne údaje z výročných monitorovacích správ z národných orgánov, týkajúcich sa nákladovej efektivity traťových služieb. Hodnoty stanovených jednotkových sadzieb odvodených z agregovaných údajov z prijatých výkonnostných plánov boli mierne nižšie pre rok 2012 a vyššie pre roky 2013 a 2014, v porovnaní s cieľmi stanovenými na úrovni Únie. Túto situáciu Európska komisia akceptovala s ohľadom na to, že RP1 bolo prvým obdobím pričom od štátov, ktoré v RP1 neprispeli dostatočne k cieľom Únie sa očakáva, že v RP2 vynaložia dodatočné úsilie na zlepšenie nákladovej efektívnosti. Skutočné náklady na traťové služby na úrovni Únie boli nižšie o 4,1%, než stanovené pre celé obdobie RP1 aj keď skutočné jednotky traťových služieb boli nižšie o 4,9% oproti stanoveným. Skutočné jednotkové náklady na úrovni Únie boli v priemere pre celé obdobie RP1 vyššie len o 0,9% než stanovené, čo bolo spôsobené nižšími jednotkami traťových služieb. Podľa Európskej únie (2018) tieto výsledky potvrdzujú, že výkonnostný systém v oblasti nákladovej efektívnosti fungoval podľa očakávaní, pričom štáty a poskytovatelia LNS prijali opatrenia na zníženie svojich nákladov v reakcii na nižší než plánovaný dopyt po leteckých službách s cieľom zachovať svoj ekonomický prebytok.

V tretej fáze zavádzania spoločného systému spoplatnenia začína aj druhé referenčné obdobie (RP2). Európska únia pokračovala v snahe viesť poskytovateľov k nákladovej efektívnosti (Materna a Novák Sedláčková, 2022). Pre traťové služby sa

uplatňoval rovnaký harmonizovaný prístup a uplatňoval sa princíp jedného poplatku za jeden let aj keď sa uskutočnil vo viacerých spoplatnených zónach. Zmena nastala v terminálnych poplatkoch pri ktorých došlo k harmonizácii výpočtu jednotiek terminálnych služieb na základe faktora hmotnosti, kde sa exponent nemenil a ostal na hodnote 0,7 pre každý členský štát. Metóda stanovených nákladov pre výpočet jednotkovej sadzby ostala taktiež nezmenená (Tomová a Havel, 2015). Pre oblasť nákladovej efektivity sa stanovili nové ciele na úrovni Únie aj na úrovni štátov. Stanovil sa druhý kľúčový ukazovateľ výkonnosti, ktorým bola nákladová efektívnosť terminálnych služieb pre ktoré sa takisto stanovili ciele výkonnosti. Performance Review Body zverejnilo analýzu údajov 30. členských štátov pre celé obdobie RP2, podľa ktorej boli skutočné jednotkové náklady na traťové služby na úrovni Únie o 9,4 % nižšie, ako cieľ stanovený na úrovni Únie pre celé obdobie RP2. Skutočné náklady na úrovni Únie boli o 3% vyššie než stanovené. Skutočný počet jednotiek traťových služieb na úrovni Únie bol až o 13,7% vyšší, než stanovená hodnota. V konečnom dôsledku sa to prejavilo na nižších skutočných jednotkových nákladoch (Európska únia, 2020, a). Ciele v terminálnych službách štáty nemuseli uplatňovať pre letiská s menej než 70 000 IFR letmi (Tomová a Havel, 2015). Skutočné náklady na úrovni štátov boli o len 1,7% vyššie než stanovené. Skutočný počet jednotiek terminálnych služieb bol o 6,3% vyšší než stanovený, čo vo výsledku pre skutočné jednotkové náklady spôsobilo, že boli nižšie o 4,4% oproti stanoveným jednotkovým nákladom za traťové služby (Európska únia, 2020, a).

Vo štvrtej fáze a treťom referenčnom období (RP3), bolo potrebné upraviť predchádzajúce nariadenia a spojiť ich v záujme sprehľadnenia a zjednotenia regulačného rámca pre štvrtú fázu zavádzania spoločného systému spoplatnenia. Novovytvorené Vykonávacie nariadenie Komisie (EÚ) 2019/317 prinieslo zlepšenie výkonnosti LNS zavedením prístupu „od odletu po pristátie“ (gate to gate), ktorý sa vzťahuje na traťové aj terminálne LNS. Optimalizovali sa toky letovej prevádzky v európskom vzdušnom priestore a znížili emisie skleníkových plynov. Nariadenie zaviedlo možnosť prístupu národných dozorných orgánov k údajom od poskytovateľov LNS, s účelom dozoru nad dodržiavaním nariadení týkajúcich sa systému výkonnosti. Okrem toho prinieslo aj sprehľadnenie systému plánovania cez definovanie finančných tokov, nákladov a investícií. Povinnosťou členských štátov sa stalo jasne definovať zóny spoplatnenia. Národné dozorné orgány dostali možnosť upraviť hodnoty parametrov zdieľania rizika objemu dopravy s ohľadom na mieste podmienky a okolnosti, s cieľom lepšej stimulácie poskytovania LNS (Materna a Novák Sedláčková, 2022). Výpočet traťových a terminálnych poplatkov sa nezmenil a metóda určenia jednotkových sadzieb takisto ostala rovnaká (Európska únia, 2019). Táto fáza bola poznamenaná pandémiou COVID-19. Opatrenia pre systém výkonnosti a spoplatňovania v rámci Jednotného európskeho neba prišli s Vykonávacím nariadením Komisie (EÚ) 2020/1627 (Materna a Novák Sedláčková, 2022). Celouňijné ciele boli revidované Vykonávacím nariadením Komisie (EÚ) 2021/891, a v súlade s týmto nariadením členské štáty predložili Komisii návrhy nových výkonnostných plánov, ktoré obsahovali revidované ciele (Európska únia, 2025). Vykonávacie nariadenie Komisie (EÚ) 2020/1627 zlúčilo roky 2020 a 2021 do jedného obdobia, v ktorom sa jednotkové sadzby počítali na základe príslušných celkových stanovených nákladov za tieto dva roky. Zlúčenie platilo aj pre predpokladané jednotky traťových služieb a

jednotkových nákladov na traťové a terminálne služby, pre ktoré boli stanovené hodnoty pre oba roky zlúčené do jednej hodnoty (Európska únia, 2020, b). V období 2020-2021 bol priemer skutočných jednotkových sadzieb traťových služieb o 93,1% vyšší, než východisková hodnota jednotkových sadzieb stanovená v roku 2019. Zníženie dopytu po službách leteckej dopravy znamenalo, že jednotky traťových služieb za roky 2020 a 2021 dosiahli len 119 miliónov, čo je len o 11 miliónov viac než v roku 2022, v ktorom sa opatrenia súvisiace s COVID-19 zmiernili (Európska únia, 2022). Roky 2022 a 2023, podľa zaznamenaných hodnôt z poslednej analýzy Performance Review Body, znamenali oživenie trhu s leteckou dopravou a zlepšenie nákladovej efektívnosti traťových aj terminálnych služieb (Európska únia, 2024, a).

Od roku 2025 začalo štvrté referenčné obdobie (RP4) Jednotného európskeho neba. Pre toto obdobie sa Európska únia zamerala na zlepšenie efektívnosti a transparentnosti v oblasti riadenia letovej prevádzky a poskytovania služieb v európskom vzdušnom priestore. Revidovali sa ukazovatele z RP3 a zaviedli sa nové na presnejšie merania výkonnosti v oblasti životného prostredia (Európska únia, 2024, b). Pre metódy určenia traťových a terminálnych poplatkov nenastala žiadna zmena (Eurocontrol, 2025, c). Možnosť neuplatňovania spoločného systému spoplatnenia platí pre letiská členských štátov s menej ako 80 000 pohybmi IFR letov za rok. Pre metódu určenia jednotkových sadzieb taktiež nenastala žiadna zmena. V nákladovej efektívnosti sa určili ciele pre traťové a terminálne služby. V oblasti nákladovej efektívnosti sa stanovili ciele pre traťové aj terminálne služby, ktoré v analýze zverejnil Performance Review Body. Jednotkové náklady majú klesať každý rok o 1,2% aj keď sa stanovili vyššie náklady za traťové služby. Podľa Európskej únie (2025, d), vyššie stanovené náklady spôsobili vyššie plánované náklady na traťové služby členských štátov, ktoré tieto údaje poskytli v plánoch výkonnosti. Eurocontrol zverejnil prognózy, ktoré hovoria o očakávanom každoročnom zvyšovaní počtu jednotiek traťových služieb. Do konca RP4, v roku 2029, sa má počet jednotiek traťových služieb dostať na hodnotu 207 miliónov jednotiek (Eurocontrol, 2025, e). Stúpanie množstva jednotiek traťových služieb, potvrdila aj Európska únia (2025).

Hlavným rozdielom medzi prvou a druhou fázou bol v rozdielnej metóde výpočtu jednotkových sadzieb. V druhej fáze boli jednotkové náklady poskytovateľov LNS nižšie oproti prvej fáze. V druhej fáze sa zaviedol spoločný systém riadenia poskytovateľov podľa výkonu a stanovili sa ciele v oblasti nákladovej efektívnosti.

Rozdiely medzi druhou a treťou fázou boli väčšie ako v predchádzajúcom porovnaní prvej a druhej fázy. Tretia fáza zaznamenala vyššiu nákladovú efektívnosť ako to bolo v druhej fáze. Došlo k harmonizácii výpočtu traťových poplatkov cez stanovenie nemenného terminálneho exponenta. Priemerné jednotkové náklady boli nižšie než v druhej fáze zavádzania spoločného systému spoplatnenia. Pre tretiu fázu sa zmenila hranica možnosti neuplatňovať systém spoplatnenia pre letiská, ktoré nedosahujú počet 70 000 IFR letov. Stanovili sa ciele pre nákladovú efektívnosť terminálnych služieb a určili sa lety oslobodené od traťových poplatkov.

Porovnať štvrtú fázu s treťou je komplikované. Celkovo vo štvrtéj fáze nedošlo k zmene metodiky výpočtov traťových a terminálnych jednotiek a ani jednotkových sadzieb. K zmene

došlo zavedením jednotného právneho rámca, ktorý stanovil pravidlá pre systémy výkonnosti a spoplatňovania. Obrázok 18 zobrazuje, čo sa zaviedlo Vykonávacím nariadením Komisie (EÚ) 2019/317. Štvrtá fáza bola významne ovplyvnená kvôli pandémie COVID-19, ktorá ochromila leteckú dopravu a pre nákladovú efektívnosť traťových a terminálnych služieb to znamenalo veľké zhoršenie. Podľa článku Eurocontrolu (2021), kríza, ktorá vznikla kvôli pandémie poukázala na zraniteľnosť politiky spoplatňovania založenej na dostupnosti služieb a prognózach jednotiek služieb, a nie na skutočnom poskytovaní služieb. Napriek tomu, problémy ktoré sa znásobili počas pandémie nepredstavujú neprekonateľný problém pre systém traťových poplatkov. Podľa Eurocontrolu (2021) bude hlavnou skúškou zachovanie spoločnej politiky, ktorá sa môže vyvíjať, prispôbiť sa výzvam v oblasti letovej prevádzky, kapacity a životného prostredia. Eurocontrol tvrdí, že by sa mali zvážiť možnosti Jednotného európskeho neba, ako napríklad jednotná jednotková sadzba alebo modulácia poplatkov.

4. Záver

Európska únia hľadala riešenia, ako sa vysporiadať s narastajúcou hustotou prevádzky leteckej dopravy. Rastúce množstvo letov spôsobovalo preťaženie systému riadenia letovej prevádzky (Európska únia, 2015). Potreba zlepšenia celkovej výkonnosti poskytovateľov LNS v Európskej únii viedla k vytvoreniu právneho rámca pre Jednotné európske nebo, ktorého jedným z cieľov bolo znížiť úroveň fragmentácie európskeho vzdušného priestoru (Tomová a Havel, 2015).

Spôsob vyberania traťových a terminálnych poplatkov sa harmonizoval v roku 2007, kedy sa prvý krát zaviedol spoločný systém spoplatnenia LNS a odštartoval sa jeho postupný vývoj do ďalších rokov. Zavádzanie spoločného systému spoplatnenia prišlo v štyroch fázach. V prvej fáze sa harmonizovala metóda výpočtu traťových poplatkov a zaviedol sa princíp jedného poplatku za let, aj keď trasa viedla cez viaceré vzdušné priestory. Terminálne poplatky boli harmonizované menej. Jednotková sadzba sa určovala metódou úplného pokrytia nákladov, ktorá nemotivovala poskytovateľov LNS k nákladovej efektívnosti (Tomová a Havel, 2015). V druhej fáze sa Európska únia zamerala na zlepšenie nákladovej efektívnosti a zaviedla spoločný systém riadenia poskytovateľov LNS podľa výkonu. Pre každý rok sa stanovili ciele nielen v oblasti nákladovej efektívnosti, ale aj v oblasti bezpečnosti, životného prostredia a kapacity vzdušného priestoru (Materna a Novák Sedláčková, 2022). V tejto fáze sa na určenie jednotkovej sadzby používala metóda stanovených nákladov, ktorá motivovala poskytovateľov k lepšej nákladovej efektívnosti (Tomová a Havel, 2015). V tretej fáze zavádzania spoločného systému spoplatnenia sa pokračovalo v zlepšovaní nákladovej efektívnosti poskytovateľov LNS. Stanovili sa nové ciele výkonnosti a došlo k zlepšeniu harmonizácie terminálnych služieb. Do tejto fázy, výsledky štúdií Európskej únie potvrdili, že systém v oblasti nákladovej efektívnosti fungoval podľa očakávania (Európska únia, 2018). Štvrtá fáza nepriniesla zmeny metodiky výpočtov traťových a terminálnych poplatkov a ani jednotkových sadzieb. Zjednotil sa právny rámec, ktorý stanovil pravidlá pre systémy výkonnosti a spoplatňovania. Táto fáza bola negatívne ovplyvnená pandemiou COVID-19, preto sa Európska únia zamerala len na znížovanie škôd spôsobených znížením dopytu po službách leteckej dopravy. Preto bolo komplikované túto fázu porovnať s predchádzajúcou v rámci nákladovej efektívnosti. Zároveň sa v tejto fáze ukázala

zraniteľnosť systému založeného na prognózach o jednotkách traťových a terminálnych služieb. V súčasnom systéme Európska únia pokračuje v zlepšovaní výkonnosti poskytovateľov LNS. Metodiky výpočtov poplatkov a sadzieb sa nezmenili a určili sa nové ciele v oblasti nákladovej efektívnosti (Európska únia, 2025).

Do ďalších rokov Eurocontrol predpokladá zvyšovanie dopytu po leteckej doprave a stým aj zvýšenie dopytu po službách poskytovateľov LNS. Kríza, ktorá vznikla v roku 2020 ukázala nevýhodu v plánovaní podľa prognózy počtu traťových a terminálnych jednotiek služieb. Eurocontrol (2021) preto poukazuje na potrebu zachovania spoločnej politiky spoplatňovania a zároveň podporuje spoločné riešenie výziev v oblasti určovania cieľov výkonnosti.

Referencie

Eurocontrol (2021). The funding of air navigation services: After 50 years, is the joint pan European system of route charges still fit for purpose?. Online. Dostupné na: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-10/eurocontrol-think-paper-14-future-system-route-charges.pdf>. [citované 2025-4-24].

Eurocontrol (2025, c). Central Route Charges Office. Online. Dostupné na: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-04/eurocontrol-customer-guide-to-charges.pdf>. [citované 2025-4-23].

Eurocontrol (2025, d). Terminal Unit Rates applicable in Europe in 2025. Online. Dostupné na: <https://www.eurocontrol.int/ServiceUnits/Dashboard/TerminalUnitRatesInForce.html>. [citované 2025-4-23].

Eurocontrol (2025, e). EUROCONTROL SEVEN-YEAR FORECAST 2025-2031. Online. Dostupné na: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-02/eurocontrol-seven-year-forecast-2025-2031-february-2025.pdf>. [citované 2025-4-24].

Európska únia (2018). EU-wide target ranges for RP 3. Online. Dostupné na: https://www.inter-fab.eu/images/user-pics/PRB_AcademicGroup/annex_1-erctrl-eurocontrol_evidence_for_establishing_the_eu-wide_rp3_targets.pdf. [citované 2025-3-24].

Európska únia (2019). Vykonávacie nariadenie Komisie (EÚ) 2019/317 z 11. februára 2019, ktorým sa stanovuje systém výkonnosti a spoplatňovania v jednotnom európskom nebi a ktorým sa zrušujú vykonávacie nariadenia (EÚ) č. 390/2013 a (EÚ) č. 391/2013 (Text s významom pre EHP). Online. Dostupné na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0317>. [citované 2025-4-5].

Európska únia (2020, a). PRB Monitoring Report 2019. Online. Dostupné na: https://eu-single-sky.transport.ec.europa.eu/document/download/a51fb116-fdca-4eae-ad7c-13afb37a254b_en?filename=amr_2019_annex_i_published.pdf. [citované 2025-4-16].

Európska únia (2020, b). Vykonávacie nariadenie Komisie (EÚ) 2020/1627 z 3. novembra 2020, o mimoriadnych opatreniach na tretie referenčné obdobie (2020 – 2024) systému výkonnosti a spoplatňovania v rámci jednotného európskeho neba v dôsledku pandémie COVID-19. Online. Dostupné na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/ALL/?uri=CELEX:32020R1627>. [citované 2025-4-13].

Európska únia (2022). Performance Review Body Monitoring Report 2021. Online. Dostupné na: https://eu-single-sky.transport.ec.europa.eu/document/download/9de1b8d8-438d-45f4-99d1-0bcbd1ae0c7c_en?filename=Annual%20monitoring%20report%202021.pdf. [citované 2025-4-15].

Európska únia (2024, a). Performance Review Body Monitoring Report 2023. Online. Dostupné na: https://eu-single-sky.transport.ec.europa.eu/document/download/154b4e6f-819a-4594-81df-8c43ab7ecff7_en?filename=240926_AMR%202023_published%20%281%29.pdf [citované 2025-4-15].

Európska únia (2024, b). VYKONÁVACIE NARIADENIE KOMISIE (EÚ) 2024/3128 zo 16. decembra 2024, ktorým sa mení vykonávacie nariadenie (EÚ) 2019/317, pokiaľ ide o nové a revidované ukazovatele na monitorovanie pre systém výkonnosti a spoplatňovania v jednotnom európskom nebi (Text s významom pre EHP). Online. Dostupné na: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202403128. [citované 2025-4-13].

Európska únia (2025). PRB assessment of the draft performance plans for RP4. Online. Dostupné na: https://eu-single-sky.transport.ec.europa.eu/document/download/a0576740-d136-4c4d-8914-bf5012e99f0a_en?filename=250324_RP4%20PP%20assessment_published.pdf. [citované 2025-4-24].

Európsky parlament (2015). Briefing European Parliamentary Research. Online. Dostupné na: <https://www.europarl.europa.eu/EPRS/EPRS-Briefing-554173-Single-European-Sky-FINAL.pdf>. [citované 2025-3-19].

MATERNA, Matúš a NOVÁK SEDLÁČKOVÁ, Alena (2022). KOMERCIALIZÁCIA POSKYTOVATEĽOV LETECKÝCH NAVIGAČNÝCH SLUŽIEB. Žilinská univerzita v Žiline. EDIS-vydavateľstvo UNIZA.

TOMOVÁ, Anna a HAVEL, Karel (2015). EKONOMIKA POSKYTOVATEĽOV LETECKÝCH NAVIGAČNÝCH SLUŽIEB. Žilinská univerzita v Žiline. EDIS-vydavateľské centrum ŽU.



VYUŽITIE MOBILNÝCH SIETÍ PRE OVLÁDANIE A PRENOS VIDEO Z UAV

Adrián Harasin

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Andrej Novák

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are increasingly used in various fields, with reliable communication and data transmission being key aspects of their effective deployment. This paper explores the use of mobile networks for remote UAV control and real-time video transmission. It analyzes the advantages and limitations of different mobile network generations, particularly 4G LTE and 5G, in terms of latency, stability, and bandwidth. The results highlight optimization possibilities and potential applications of mobile networks in areas such as monitoring, security operations, and autonomous systems. Additionally, the thesis examines technological challenges and security aspects that impact the reliability of this solution.

Keywords

UAV, Mobile networks, Video transmission, Remote control, 5G, 4G LTE

1. Úvod

Bezpilotné lietadlá (UAV) predstavujú dôležitý prvok moderných technologických riešení, ktoré nachádzajú uplatnenie v širokom spektre civilných aj priemyselných aplikácií od monitorovania a mapovania až po logistiku či bezpečnostné akcie. S rastúcou automatizáciou rastie aj požiadavka na vzdialené ovládanie mimo vizuálneho kontaktu (BVLOS) sa do popredia dostáva otázka spoľahlivého a bezpečného komunikačného kanála medzi UAV a pozemnou stanicou.

Tradičné technológie prenosu dát, ako sú napríklad krátkodosahové rádiové spojenie alebo Wi-Fi, sú často limitované dosahom, stabilitou signálu a kapacitou prenosu. V takomto kontexte sa mobilné siete využívajúce infraštruktúru celoplošného pokrytia javia ako vhodná alternatíva pre komunikáciu s UAV v reálnom čase. Ich využitie umožňuje rozšíriť prevádzkový rádius bezpilotných prostriedkov a zvýšiť spoľahlivosť prenosu ovládania a telemetrických dát a zároveň zadovážiť kvalitný prenos vizuálnych informácií.

Cieľom práce je preskúmať celkové možnosti využitia mobilných sietí pre prenos ovládania a videa z UAV. Práca sa zameriava na technické aspekty integrácie UAV do infraštruktúry mobilných sietí, s dôrazom na parametre ako prenosová kapacita, latencia, spoľahlivosť spojenia či geografické pokrytie. Výsledkom práce je komplexné zhodnotenie predpokladov a obmedzení, ktoré mobilné siete prinášajú pri implementácii do systémov riadenia UAV.

Vzhľadom na rastúci počet UAV v zdieľanom priestore je potrebné posúdiť, ako mobilné siete prispievajú k ich bezpečnej prevádzke. Taktiež sa venuje regulačným výzvam spojeným s využívaním týchto sietí. Výsledky môžu slúžiť ako základ pre ďalší výskum v oblasti komunikácie.

2. Metodika a metódy skúmania

Metodikou tejto záverečnej práce je vychádzať z analytického prístupu, pričom cieľom je získať ucelený pohľad na možnosti využitia mobilných sietí pri riadení bezpilotných lietadiel (UAV) a prenose vizuálneho kontaktu v reálnom čase. Skúmanie je založené na analýze dostupnej odbornej literatúry, technickej dokumentácie, platných štandardov a prípadových štúdií z reálnej prevádzky UAV v prostredí mobilných sietí.

Práca využíva metódu deskriptívnej analýzy, ktorej cieľom je systematicky opísať princípy fungovania mobilných sietí od Bluetooth až po 5G sieť, ako aj parametre prenosu vrátane latencie, dostupnosti signálu a bezpečnostných požiadaviek. Následne sa uplatňuje komparatívna metóda, pomocou ktorej sú porovnávané vlastnosti jednotlivých typov mobilných sietí z hľadiska ich použiteľnosti pre riadenie UAV a prenos videa. Zámerom je určiť, ktoré technologické riešenia poskytujú optimálny kompromis medzi spoľahlivosťou spojenia a kvalitou prenosu.

Dôležitou súčasťou metodiky je aj kritická analýza bezpečnostných aspektov, vrátane zraniteľnosti prenosových kanálov, možnosti autentifikácie a šifrovania, ako aj spôsobov zmiernenie rizík pri komunikácii UAV prostredníctvom verejných mobilných sietí.

Výstupom aplikácie uvedených metód je vytvorenie prehľadového rámca, ktorý sumarizuje technické predpoklady, limity a perspektívy využitia mobilných sietí v oblasti bezpilotného letectva. Takto definovaný prístup umožňuje komplexne posúdiť, do akej miery sú súčasné mobilné siete schopné zabezpečiť stabilnú, efektívnu a bezpečnú komunikáciu medzi UAV a pozemnou stanicou.

3. Výsledky

Prenos videa a ovládanie cez Wi-Fi, 4G, 5G a Bluetooth

Wi-Fi – sa osvedčila pri prenosoch videa v krátkych vzdialenostiach do 100 metrov. Prenos je stabilný, avšak môže byť ľahko ovplyvnený najmä v prostrediach s vysokým rušením. Latencia sa pohybuje medzi 30 až 50 ms, čo je prijateľné pre väčšinu aplikácií. Wi-Fi je teda vhodná pre jednoduchšie aplikácie, ktoré nevyžadujú dosah ani vysokú kapacitu.

4G – poskytuje stabilný prenos videa na väčšie vzdialenosti. Latencia sa pohybuje medzi 60 až 80 ms, čo je dostatočne pre komerčné aplikácie, ako sú monitorovanie a kontrola UAV v reálnom čase. Kapacita prenosu je primeraná na HD video, avšak v prípade preťaženia siete môže dôjsť k zníženiu kvality prenosu. 4G je vhodnejšie pre oblasti s dostatočným pokrytím, ale jeho spoľahlivosť môže byť ovplyvnená hustotou prevádzky.

5G – prináša zásadné zlepšenie oproti 4G, s latenciou nižšou ako 10 ms a vysokou priepustnosťou až 1 Gbps. Tento typ siete umožňuje prenos videa vo veľmi vysokej kvalite až 4K a vyššie v reálnom čase. 5G je ideálnym riešením pre aplikácie, ktoré vyžadujú okamžitú reakciu, ako je riadenie UAV v režime BVLOS. Okrem toho poskytuje stabilné spojenie aj na veľké vzdialenosti, čo robí túto technológiu najvhodnejšou pre profesionálne nasadenie UAV.

Bluetooth – má veľmi nízku priepustnosť, ktorá nepostačuje na prenos videa. Je vhodný iba pre aplikácie, ktoré nevyžadujú vysokú prenosovú kapacitu, ako je prenos telemetrických údajov a ovládanie UAV na krátke vzdialenosti maximálne do 30 metrov. Bluetooth je preto nevhodný pre aplikácie vyžadujúce stabilný a kvalitný prenos videa.

V tabuľke nižšie je prehľadne zobrazené porovnanie jednotlivých mobilných sietí z hľadiska prenosovej kvality.

Sieť	Rýchlosť	Latencia	4K	2K	1080p	720p	480p
Bluetooth	2Mbps	100-200 ms	✗	✗	✗	500-800 ms	300-600ms
Wi-Fi (802.11g)	100Mbps	10-30 ms	30-50 ms	20-40 ms	15-35 ms	10-30 ms	5-20 ms
4G	50Mbps	30-50 ms	50-80 ms	40-70 ms	35-60 ms	30-55 ms	25-50 ms
4G LTE	100Mbps	20-40 ms	40-70 ms	30-60 ms	25-50 ms	20-45 ms	15-40 ms
5G	1000Mbps	1-10 ms	5-15 ms	3-12 ms	2-10 ms	1,5-8 ms	1-5 ms

Rozdelenie dosahov a kvality prenosu videa z UAV

Bluetooth – má veľmi krátky dosah, spravidla do 30 metrov. Na prenos videa nie je vhodný. Prenos je pomalý a nekonzistentný. Využíva sa len na základnú telemetriu alebo jednoduché príkazy bez obrazu. V prostredí s viacerými zariadeniami môže byť signál rýchlo narušený. Jeho výhodou je nízka spotreba energie, čo sa využíva pri jednoduchých technických systémoch.

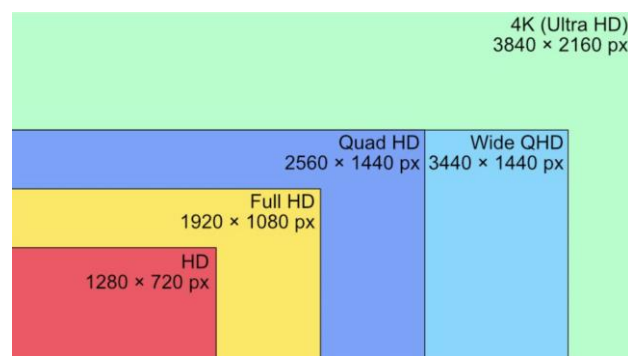
Wi-Fi – umožňuje prenos videa na vzdialenosť do 150 metrov. V otvorenom priestore je prenos stabilnejší než v zastavaných oblastiach. Prenos je vhodný pre video v rozlíšení 720p až 1080p, v závislosti od rušenia. Pri väčšej vzdialenosti môže dôjsť k výpadkom alebo oneskoreniu prenosu obrazu. Wi-Fi sa často

využíva pri hobby dronoch a v testovacích scenároch. Výhodou je dostupnosť a jednoduchá implementácia, no zároveň citlivosť na rušenie.

4G – poskytuje prenos na vzdialenosť niekoľko kilometrov. Spojenie je závislé od dostupnosti mobilného signálu. Prenos videa je možný v kvalite 1080p, niekedy aj 2K, no latencia býva vyššia 60 až 80 ms. Prenos je vhodný na monitorovanie alebo dohľad, kde nie je nutná okamžitá odozva. Pri dobrom pokrytí ide o spoľahlivé a široko dostupné riešenie. 4G sa uplatňuje v poloprofesionálnych a priemyselných aplikáciách, kde je dôležitý dosah a plynulosť prenosu.

5G – umožňuje stabilný prenos videa vo vysokom rozlíšení aj na veľké vzdialenosti. V mestskom pokrytí je možné prenášať video v 4K kvalite, s veľmi nízkou latenciou do 10 ms. 5G je ideálne pre aplikácie, ktoré vyžadujú rýchlu reakciu a ostrý obraz v reálnom čase. Táto technológia predstavuje najvyšší štandard pre moderné UAV systémy. Vďaka nízkej latencii sa využíva aj v autonómnych a kritických systémoch, kde je potrebná presná a rýchla spätná väzba.

V nasledujúcom obrázku sú znázornené štandardy jednotlivých rozlíšení videí.



Spektrálne pásma

Kamery používané na bezpilotných lietadlách môžu snímať obraz v rôznych častiach elektromagnetického spektra. Každé spektrálne pásmo prináša odlišné informácie o snímanom prostredí. V praxi sa najčastejšie využíva viditeľné spektrum RGB, infračervené IR a ultrafialové UV spektrum.

RGB (červeno-zeleno-modré) spektrum – predstavuje viditeľné svetlo, ktoré zodpovedá tomu, čo vníma ľudské oko. Kamery v tomto pásme vytvárajú farebný obraz, ktorý sa používa pri vizuálnom pozorovaní, dokumentácii alebo navigácii. RGB kamery sú bežné pri hobby dronoch aj profesionálnych systémoch. Výhodou je jednoduché vyhodnotenie obrazu v reálnom čase.

IR (infračervené) pásmo – slúži na detekciu tepla. Infračervené kamery dokážu snímať tepelné rozdiely medzi objektmi, ktoré nie sú voľným okom viditeľné. Tento typ snímania je vhodný na záchranné operácie, detekciu požiarov, monitorovanie vegetácie, ale aj na technické inšpekcie budov. Infračervený obraz môže byť použitý aj v noci alebo pri zníženej viditeľnosti.

UV (ultrafialové) spektrum – sa nachádza mimo viditeľného rozsahu. Kamery pracujúce v tomto pásme zaznamenávajú žiarenie s kratšou vlnovou dĺžkou. UV snímanie. Sa využíva najmä v špecifických priemyselných alebo vedeckých

aplikáciách. Umožňuje detegovať mikrotrhliny, chemické zmeny na povrchu materiálov alebo úniky niektorých plynov.

Jednotlivé spektrálne pásma sa môžu kombinovať v jednom systéme. Multispektrálne alebo termálne kamery umožňujú získavať komplexnejšie informácie o prostredí. Výber vhodného pásma závisí od konkrétneho účelu použitia UAV.

Špeciálne delenie frekvencií

Bezdrôtová komunikácia UAV sa uskutočňuje v rôznych frekvenčných pásmach, ktoré sú medzinárodné alebo národné regulované. Frekvenčné spektrum je rozdelené tak, aby sa predišlo vzájomnému rušeniu a zabezpečila sa spoľahlivá prevádzka všetkých služieb. Špeciálne delenie znamená, že určité pásma sú vyhradené pre špecifické účely. Niektoré frekvencie sú určené na verejnú komunikáciu, iné pre bezpečnostné, letecké alebo vojenské použitie. Takéto rozdelenie umožňuje lepšiu organizáciu a kontrolu využitia rádiového spektra.

ISM pásma – (Industrial, Scientific and Medical) sú frekvenčné rozsahy voľne dostupné pre široké použitie bez potreby individuálneho povolenia. Patria sem napríklad pásma 2,4 GHz a 5,8 GHz, ktoré využíva aj veľká časť UAV pre prenos dát alebo ovládania. Tieto pásma sú však náchylnejšie na rušenie, pretože ich využíva množstvo zariadení, ako sú Wi-Fi siete, Bluetooth či mikrovlnné rúry.

Pridelené pásma – sú tie, ktoré štátne alebo medzinárodné regulačné orgány pridelujú konkrétnym službám alebo organizáciám. Môžu to byť napríklad pásma pre mobilné siete (4G, 5G). UAV využívajú tieto pásma v prípadoch, keď je vyžadovaná vyššia spoľahlivosť alebo licencia na prevádzku.

Vojenské frekvencie – sú špecifické pásma, vyhradené pre armádu a obranné systémy. Tieto frekvencie nie sú verejne prístupné a ich používanie je prísne kontrolované. Vojenské UAV využívajú šifrované spojenia na chránených frekvenciách, aby bola zaistená bezpečnosť komunikácie a odolnosť voči rušeniu alebo odpočúvaniu.

Rušenie frekvencií – predstavuje významný problém v bezdrôtovej komunikácii UAV. Môže nastať, ak viac zariadení pracuje na rovnakých alebo blízkych frekvenciách. Rušenie spôsobuje zníženie kvality prenosu, výpadky spojenia alebo úplnú stratu ovládania dronu. Preto je dôležité správne plánovať využitie frekvencií a pri kritických misiách používať spoľahlivejšie alebo rezervované pásma.

Správne riadenie frekvenčného spektra je základom pre bezpečné a efektívne využívanie UAV v rôznych oblastiach, od hobby nasadenia až po profesionálne a vojenské operácie.

4. Záver

V tejto bakalárskej práci som sa zaoberal využitím mobilných sietí pri ovládaní a prenose dát z bezpilotných lietadiel (UAV). Zamerail som sa najmä na siete 4G LTE a 5G, ktoré vďaka nízkej latencii, vysokej priepustnosti a spoľahlivému pokrytiu umožňujú efektívny a bezpečný prenos riadiacich aj senzorických dát v reálnom čase. Podrobnejšie som analyzoval výhody 5G technológie, ako sú ultranízka latencia (<1 ms), vysoká kapacita a podpora masívnej konektivity. Dôležitým aspektom využitia mobilných sietí je aj zvýšenie kvality a stability

prenosu videa a dát z UAV na zem. Najmä 5G umožňuje **streamovanie videa vo vysokom rozlíšení (napr. 4K alebo 8K)** v reálnom čase bez výpadkov a oneskorenia. Vďaka tomu môže byť operátor dronu neustále v spojení s vizuálnym aj technickým výstupom z bezpilotného lietadla (UAV), čo zvýši bezpečnosť a presnosť prevádzky. Navyše, sieťová infraštruktúra 5G umožňuje **paralelný prenos rôznych typov dát**, ako sú napríklad údaje z termokamier, LIDARu alebo iných senzorov, bez narušenia kvality spojenia. Do budúcnosti považujem za dôležité riešiť otázky **regulácie, bezpečnosti komunikácie a efektívnej integrácie UAV do mobilnej infraštruktúry** vrátane spolupráce s tzv. **U-Space** systémami pre manažment vzdušného priestoru. Mobilné siete, najmä 5G, majú potenciál stať sa kľúčovým prvkom pri budovaní robustného ekosystému pre UAV prevádzku, a tým umožniť bezpečné, škálovateľné a inteligentné využitie dronov vo verejnom aj súkromnom sektore.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 54ŽU-4/2025 "Možnosti využitia umelej inteligencie v študijnom programe letecká doprava pri výučbe pilotov a technikov údržby. (SmartSkyEdu)"

Referencie

Alza, „Rozlíšenie 4K (Ultra HD),“ 26 Október 2020. [Online]. Available: <https://www.alza.sk/rozlisenie-4k-ultra-hd-art7638.htm>.

E. INFO, „Wi-Fi – info, limity, meranie, účinky, možnosti ochrany,“ 19 Apríl 2025. [Online]. Available: <https://elektrosmog-info.voxo.eu/wi-fi>.

J. Ř. Jaroslav Kocourek, Drony, Praha: TELINK, spol. s r. o., 2021.

T. s.r.o., „Terradron.sk,“ 2020. [Online]. Available: <https://terradron.sk>.

Ú. p. r. e. k. a. p. s. (ÚREKPS), „Slov-Lex,“ 1 Január 2021. [Online]. Available: https://static.slov-lex.sk/pdf/prilohy/SK/ZZ/2020/367/20210101_5279389-2.pdf.

Wikipédia, „Rozlišovacia schopnosť,“ 15 Apríl 2025. [Online]. Available: [https://sk.wikipedia.org/wiki/Rozlišovacia_schopnosť_\(monitor\)](https://sk.wikipedia.org/wiki/Rozlišovacia_schopnosť_(monitor)).



HISTÓRIA LETECKEJ METEOROLÓGIE

Timon Havlík
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Miriam Jarošová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

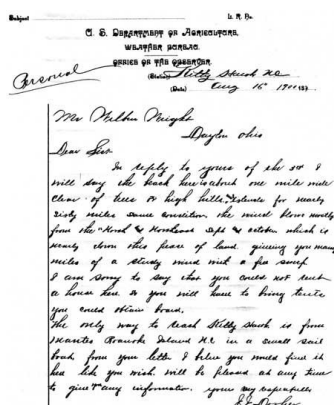
This article traces the evolution of aviation meteorology from its earliest synoptic observations to today's AI-driven forecasting systems. Through a structured literature review and analysis of key milestones—ranging from Aristotle's *Meteorologica* and early instruments (anemometer, barometer) to the establishment of Meteor R.E. in World War I, the METAR/TAF standardization in 1968, and the founding of ECMWF—this study highlights how terminology, data formats and distribution methods have continuously advanced. A comparative assessment of past and present practices reveals dramatic improvements in data timeliness (hours to seconds), measurement accuracy, and global coverage via ASOS/AWOS, GTS/SWIM and satellite networks (MetOp, Meteosat). Finally, it examines emerging applications of AI and support vector machines for hyper-local nowcasting and 4D trajectory planning, underscoring the need for ongoing international collaboration and technological innovation to meet the challenges of an ever-changing atmosphere.

Keywords

history, terminology, communication, automatization, aviation meteorology

1. Úvod

Počasie sprevádza letectvo už od prvého úspešného letu bratov Wrightovcov v roku 1903, keď piloti museli spoliehať na jednoduché pozorovania vetra a oblačnosti [1]. Počas prvej svetovej vojny bola v lete 1915 zriadená prvá operatívna vojenská meteorologická služba „Meteor R.E.“, ktorá zásadne zlepšila predpovede pre letecké operácie [2]. V civilnom sektore bol potom od 1. januára 1968 zavedený jednotný formát METAR a TAF pre pravidelné správy o počasí na letiskách [3] [4]. Dnešné služby využívajú prepojené siete pozemných staníc, automatizované systémy ako ASOS/AWOS, satelitné dáta aj globálne telekomunikačné siete, aby pilotom i dispečerom priniesli presné a včasné meteorologické informácie [5]. Tento článok teda obsahuje prepojenie historických míľnikov, vývoja terminológie a moderné technológie, aby sa poukázalo, ako sa letecká meteorológia formovala od úplného začiatku až po predpovede riadené AI.



Obrázok 1: List pre bratov Wrightovcov obsahujúci aj informácie o poveternostných podmienkach [1]

2. Metodika a metódy skúmania

Pre spracovanie tejto problematiky som si ju rozdelil na tri časti:

- História leteckej meteorológie
- Vývoj názvoslovia, distribúcie informácií pre letectvo
- Porovnanie minulosti a súčasnosti

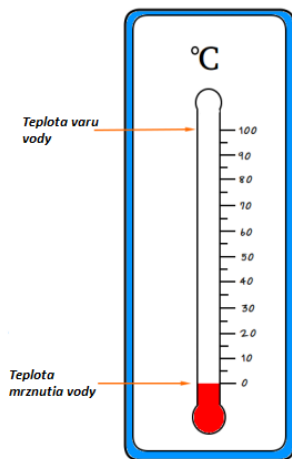
Informácie pre spracovanie určitých bodov tejto problematiky boli čerpané z rôznych internetových zdrojov. Na doplnenie a overenie faktov som využil oficiálne stránky ako ICAO, WMO či EUMETSAT, ako aj rôzne odborné články.

3. Začiatky leteckej meteorológie

Aj keď sa meteorológia ako veda formovala už počas antiky a renesancie, jej priama aplikácia v letectve bola stále iba v počiatkoch. K niektorým z kľúčových prác a prístrojov, ktoré položili základy pre neskorší rozvoj leteckej meteorológie patria:

- Dielo *Meteorologica* – Aristoteles (4. st. p.n.l.) vo svojom diele popísal a klasifikoval vietor, oblačnosť, zrážky a hmlu, čím stanovil prvé systematické rozdelenie atmosférických javov, aj keď dnes už vieme že jeho tvrdenia boli nepravdivé [6]
- Anemometer – Leon Battista Alberti – prvé anemometre (1450) premieňali silu vetra na rotačný pohyb lopatiek a tým umožnili prvé kvantitatívne meranie rýchlosti vetra [7]
- Teplomér – Santorio Santorio (1612) – bolo zariadenie so vzduchom a kvapalinou v trubici reagujúce na zmeny teploty vizuálnym posunom hladiny (predchodca kalibrovaného teplomera) [8]

- Barometer – Evangelista Torricelli (1643 - 1644) – vynášiel ortuťový barometer na meranie atmosférického tlaku, vďaka ktorému bolo možné spoľahlivejšie odhadovať zmeny počasia [9]
- Predpovede – aj keď meteorologické stanice dokázali zaznamenávať dáta, konzistentné a presné predpovede pred Prvou svetovou vojnou stále chýbali [10]
- Celsiova teplotná stupnica (18. stor.) – Anders Celsius zaviedol Celsiovu stupnicu, ktorá mala pri bode varu vody hodnotu 0°C a pri bode mraznutia vody 100°C, avšak do dnešnej podoby bola otočená po jeho smrti [11]
- Synoptické mapy (60. roky 19. stor.) – Francis Galton vytvoril prvú mapu zobrazujúcu tlak, teplotu a počasie z údajov z telegrafickej siete, čím položil základy moderných synoptických máp [6]



Obrázok 2: Celsiova stupnica v dnešnej podobe [12]

4. Vývoj v období Prvej svetovej vojny do 90. rokov 20. storočia

Počas Prvej svetovej vojny (1915) Britská armáda zriadila prvú vojenskú meteorologickú jednotku pod názvom *Meteor R.E.*, ktorá pilotom poskytovala delostrelecké korekcie a prvé operatívne letecké predpovede. [13] Počas medzivojnového obdobia sa civilné meteorologické služby rozširovali aj na nášom území. V decembri 1921 vznikla Letecká poveternostná stanica č. 2 Košice, zriadená na starom košickom letisku [14] a v júli 1922 Letecká poveternostná stanica Bratislava-Vajnory [15], ktoré poskytovali pravidelnú správy pre pilotov civilného i vojenského letectva. V roku 1937 vyšla odborná publikácia od Gustava Swobodu s názvom *Letecká meteorologie i poveternostní služba letecká* a zároveň bola do českého jazyka preložená aj publikácia od Sergeja Chromovova *Úvod do synoptického rozboru počasí* Mikulášom Končekom. [16] Druhá svetová vojna urýchlila technologický rozvoj – zaviedli sa rádiové sondy, radarové merania oblačnosti a taktické predpovedanie počasia pre invázne operácie. [17] Povojnová konsolidácia začala Chicagskou konvenciou (1944) [18] a založením ICAO (1947), ktoré v roku 1948 prijalo Annex 3 s prvými medzinárodnými štandardmi pre letecké meteorologické služby [19] a v roku 1950 vznikla WMO na koordináciu globálnej výmeny údajov. [20] Následné desaťročia sa postupne budovali rádiové sondy

pre výškové merania a začleňovali sa národné stanice do globálnych sietí. Zlomovým bodom sa stal rok 1975, keď vzniklo Európske centrum pre strednodobé predpovede počasia (ECMWF), ktoré zjednotilo modelovanie predpovedí v celej Európe. [21] Z oblasti terminológie boli v tomto období zavedené aj dve dôležité formy poskytovania informácií o meteorologických podmienkach na letisku, a to METAR a TAF. METAR poskytuje informácie o aktuálnom počasi na letisku, pričom TAF poskytuje predpoveď počasia na dobu 24-30 hodín [22].

METAR LZIB 220230Z 29006KT 9999 FEW016 14/11 Q1013 NOSIG=

Obrázok 12: Príklad správy METAR [23]

5. Súčasný stav a budúcnosť leteckej meteorológie

Od začiatku 90. rokov prišlo k zásadnej transformácii leteckej meteorológie. Manuálne pozorovacie a komunikačné metódy nahradili automatizované systémy a digitálna výmena dát. Súčasnnosť a možná budúcnosť tohto odvetvia je možná obsiahnuť v nasledujúcich bodoch:

- Automatizované systémy ASOS/AWOS – poskytujú kontinuálne merania teploty, tlaku, vetra a viditeľnosti priamo na letiskách bez potreby neustálej ľudskej prítomnosti [24]
- Globálny komunikačný systém GTS – je prevádzkovaný Svetovou meteorologickou organizáciou a zabezpečuje rýchlu a štandardizovanú výmenu meteorologických údajov [25]
- EUMETNET – je medzinárodné zoskupenie 33 európskych národných meteorologických služieb, ktoré koordinuje programy ako OPERA, E-AMDAR, teda výskumné projekty zamerané na zlepšenie kvality a jednotnosti meteorologických dát v Európe [26]
- MetOp satelity – sú polárne orbitálne družice, ktoré neustále zbierajú vysokorozlišné údaje o atmosfére, oceánoch a povrchu, kľúčové pre numerické modelovanie a klimatickú monitorovaciu sieť [27]
- SWIM – súčasť SESARu ako štandardizovaná výmena meteorologických a letových dát, vrátane 4D „weather cube“, ktorý umožňuje plynulú integráciu presných predpovedí priamo do riadenia letovej prevádzky [28]
- AI predpovede – od februára 2025 je v prevádzke prvý plne operačný, strojovo učením riadený model AIFS, ktorý beží súbežne s IFS. AIFS dosahuje približne 20% lepšiu presnosť v trasách tropických cyklón a spotrebuje tisícnásobne menej energie na jeden prognostický cyklus [29]
- 4D trajektórie – integrujú čas ako štvrtú dimenziu, čo umožňuje optimalizovať plánovanie a bezpečnosť letov s ohľadom na predpovedané poveternostné zmeny [30]
- ATN/IPS (Aeronautical Telecommunication Network – Internet Protocol Suite) – systém, ktorý ponúka výmenu OPMET dát vo formáte IWXXM/XML, ktorý od 90. rokov nahrádza staršie telegrafné siete [31]

- AI a SVM – moderné systémy využívajú strojové učenie (neurónové siete, SVM – support vector machines) na automatizovanú detekciu nebezpečných javov, optimalizáciu trás a krátkodobé predpovede s vyššou presnosťou [32] [33]

6. Porovnanie minulosti a súčasnosti

Kedysi bola letecká meteorológia záležitosťou jednotlivcov, ktorý získavali potrebné meteorologické informácie manuálnymi meraniami. Ručne sa skladali synoptické mapy a správy sa šírili telegrafom v hodinových a niekedy až denných intervaloch. Bezpečnosť letov závisela od skúseností meteorológov a pilotov, ktorí vyhodnocovali obmedzené meteorologické informácie s často veľkými medzerami v pokrytí vysokých výšok či oceánov. Dnes už máme k dispozícii nepretržite plne automatické pozorovacie siete (ASOS/AWOS), globálnu telekomunikačnú infraštruktúru GTS/SWIM s prenášaním OPMET správ v reálnom čase a rozsiahlu sieť rádiových sond a satelitov (MetOp, Meteostat), ktoré nám poskytujú trojrozmerné dáta z celej planéty. Numerické modely ECMWF vrátane AI-riadeného AIFS a SVM-algoritmov automaticky riadia presnejšie predpovede a hyperlokálny nowcasting, čo znamená lepšiu optimalizáciu trás, flexibilnejšie plánovanie a výrazne vyššiu odolnosť voči rôznym nebezpečným javom. Výsledkom je nárast letovej bezpečnosti, efektivity paliva aj dostupnosti meteorologickej podpory pre každý typ letov.

7. Záver

Prehľad histórie leteckej meteorológie nám ukazuje, že táto disciplína prešla od prvotných synoptických pozorovaní a ručne zhotovených máp k vojenským predpovediam počas dvoch vojenských konfliktov k neskôr medzinárodným štandardom ako sú METAR a TAF. Súčasná sieť ASOS/AWOS, GTS/SWIM a satelitné programy MetOp či Meteostat zabezpečujú takmer okamžitý prenos a vysokú presnosť meteorologických dát, čo zásadne zvyšuje bezpečnosť a efektivitu leteckej dopravy. Z terminologického hľadiska sme prešli od rôznych pomenovaní v rôznych krajinách k digitálnym formátom IWXXM a protokolom ATN/IPS, ktoré umožňujú plne automatizovanú výmenu OPMET údajov. Budúcnosť leteckej meteorológie spočíva v ďalšej integrácii umelej inteligencie, strojového učenia a hyperlokálneho nowcastingu do existujúcich systémov SWIM, čo otvorí nové možnosti o predikcii krátkodobých nebezpečných javov a optimalizácii letových trás v reálnom čase. Aby bola letecká meteorológia dosiahnuť týchto cieľov, je nevyhnutná medzinárodná spolupráca, inovácia technológií a štandardizácia protokolov, aby sme boli pripravení čeliť výzvam meniacich sa klimatických podmienok.

Referencie

- [1] National Weather Service, „weather,“ 2013. [Online]. Available: <https://www.weather.gov/mhx/FirstFlight>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [2] Met Office, „metoffice,“ [Online]. Available: <https://www.metoffice.gov.uk/research/library-and-archive/archive-hidden-treasures/end-of-world-war-one>. [Cit. 27 Apríl 2025].

- [3] Isle of wight weather, „isleofwightweather,“ [Online]. Available: <https://www.isleofwightweather.co.uk/skymet.htm>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [4] T. Vasquez, „ifr-magazine,“ [Online]. Available: <https://ifr-magazine.com/weather/taf-dissected/>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [5] Pilot Institute, „pilotinstitute,“ 23 Máj 2023. [Online]. Available: <https://pilotinstitute.com/atis-vs-awos-vs-asos/>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [6] C. A. d. S. Valdir Adilson Steinke, „mdpi,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2225-1154/5/1/23>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [7] APPEL News Staff, „appel.nasa,“ 29 Máj 2007. [Online]. Available: https://appel.nasa.gov/2010/02/28/ao_2-3_f_anemometer-html/. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [8] istranet, „istranet,“ 23 Október 1999. [Online]. Available: <https://www.istranet.org/istria/illustri/santuario/index.htm>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [9] S. P. Raikar, „britannica,“ 31 December 2024. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/mercury-barometer>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [10] B. Sheils, „smithsonianmag,“ 18 Máj 2017. [Online]. Available: <https://www.smithsonianmag.com/history/how-world-war-i-changed-weather-good-180963360/>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [11] astro, „astro,“ [Online]. Available: https://www.astro.uu.se/history/Celsius_eng.html. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [12] math-dictionary, „math-dictionary,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.math-dictionary.com/celsius-scale.html>. [Cit. 24 Apríl 2025].
- [13] Met Office, „metoffice,“ [Online]. Available: <https://www.metoffice.gov.uk/research/library-and-archive/archive-hidden-treasures/first-military-forecast>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [14] D. V. Jozef Pecho, „shmu,“ 29 December 2021. [Online]. Available: <https://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=1186>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [15] Jozef Pecho, Dalibor Výberčim Branislav Chvíla, „shmu,“ 13 Január 2022. [Online]. Available: <https://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=1188>. [Cit. 24 Apríl 2025].

- [16] vojzesl, „vojzesl,” [Online]. Available: www.vojzesl.cz/prispevky/100_let_SUM.html. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [17] P. Edward J. Hopkins, „meteor.wisc,” 10 Jún 1996. [Online]. Available: www.meteor.wisc.edu/~hopkins/aos100/wxi-raob.htm. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [18] I. M. Čech, „dSPACE.cuni,” 14 December 2015. [Online]. Available: https://dSPACE.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/80844/DPTX_2013_1_11220_0_177424_0_145560.pdf. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [19] pacificmet, „pacificmet,” [Online]. Available: <https://www.pacificmet.net/sites/default/files/inline-files/documents/WP%2012.2.1%20Att%201.pdf>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [20] WMO, „wmo,” [Online]. Available: <https://wmo.int/about-wmo/history-of-imo-and-wmo>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [21] ECMWF, „ecmwf,” [Online]. Available: www.ecmwf.int/en/about/who-we-are. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [22] DroneTribe, „dronetribe,” [Online]. Available: <https://dronetribe.io/remote-pilot-metars-tafs/>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [23] SHMÚ, „shmu,” 22 Apríl 2025. [Online]. Available: <https://www.shmu.sk/sk/?page=483>. [Cit. 24 Apríl 2025].
- [24] SkyBrary, „skybrary,” [Online]. Available: <https://skybrary.aero/articles/automated-weather-observing-system-awos>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [25] WMO, „community.wmo,” [Online]. Available: <https://community.wmo.int/en/activity-areas/global-telecommunication-system-gts>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [26] EUMETNET, „eumetnet,” [Online]. Available: <https://www.eumetnet.eu/about-us-2/>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [27] EUMETSAT, „eumetsat,” [Online]. Available: <https://www.eumetsat.int/metop>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [28] SesarJoint Undertaking, „sesarju,” [Online]. Available: <https://www.sesarju.eu/sesar-solutions/meteorological-information-exchange>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [29] ECMWF, „ecmwf,” 25 Február 2025. [Online]. Available: <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/2025/ecmwf-ai-forecasts-become-operational>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [30] SKYbrary, „skybrary,” [Online]. Available: <https://skybrary.aero/articles/4d-trajectory-concept>. [Cit. 27 Apríl 2025].



VÝŠKA ZÁKLADNE OBLAČNOSTI NA LETISKU ŽILINA PRI ROZLIČNÝCH POVETERNOSTNÝCH SITUÁCIÁCH

Matej Hromadík
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Miriám Jarošová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This paper focuses on the analysis of cloud base height at Žilina Airport under various weather conditions. The objective of the paper is to analyze the cloud base height in relation to atmospheric fronts, pressure systems, and associated meteorological phenomena that directly affect the safety of air operations, with particular emphasis on training flights conducted under Visual Flight Rules (VFR). The study utilizes METAR reports and synoptic maps provided by the Slovak Hydrometeorological Institute (SHMÚ). The months of August and November 2024, and January 2025, were selected for examination. Based on these data, an analysis was conducted of the occurrence of different cloud types, their base heights, and related weather phenomena such as fog, rain, thunderstorms, and reduced visibility. The results highlight typical cloud development patterns under specific synoptic conditions, contributing to better planning of air operations and enhancing safety, especially during training flights. The thesis also provides recommendations for increased attention during particular weather situations that may lead to limitations or complete suspension of flight operations.

Keywords

Cloud cover, Cloud base, Žilina Airport, METAR

1. Úvod

Správna identifikácia poveternostných javov v letectve hrá kľúčovú úlohu v otázkach bezpečného plánovania letu, k jeho vykonaniu, ale aj k pohodliu cestujúcich na palube. Pre pilotov aj inštruktorov je dôležité mať presné a aktualizované informácie o poveternostnej situácii, najmä ak ide o výcvikové lety podľa pravidiel VFR (Visual Flight Rules). Jedným z hlavných prvkov, ktoré ovplyvňujú, či je možné let bezpečne uskutočniť, je výška základne oblačnosti. Oblačnosť úzko súvisí s dohľadnosťou na dráhe ako aj s celkovou dohľadnosťou. Negatívne ovplyvňuje schopnosť pilota orientovať sa v teréne pomocou zraku, pohľadom z kokpitu lietadla.

Meteorologické faktory často figurujú ako jeden z aspektov, ktorý mal priamy vplyv na leteckú nehodu. Možno spomenúť najväčšiu leteckú katastrofu v dejinách na ostrove Tenerife, kedy kvôli hustej hmle posádka letu 4805 spoločnosti KLM nebola schopná zahliadnuť lietadlo Pan Am, ktoré sa vyskytovalo na vzletovej a pristávacej dráhe. Zahynulo 583 pasažierov a členov posádky. Ďalším príkladom je letecká nehoda bývalého poľského prezidenta. Piloti vládneho špeciálu Tu-154M ignorovali zníženú viditeľnosť a pokúsili sa vykonať priblíženie. Kvôli nedostatočnému uvedomeniu si blízkosti terénu narazili do stromov ešte pred dosiahnutím prahu dráhy leteckej základne pri Smolensku. Nehodu nikto neprežil. Tieto tragédie poukazujú, čo sa stane pri podcenení meteorologických podmienok.

Ani výcvikové lety nie sú výnimkou – prudké zhoršenie počasia v podobe búrok, tvorba hmiel, nízka oblačnosť či námraza môžu spôsobiť komplikácie pri ich bezpečnom vykonaní.

Práve preto som sa v článku rozhodol venovať sledovaniu výšky základne oblačnosti na Letisku Žilina v rôznych poveternostných podmienkach. Cieľom je zanalyzovať výšku základne pri rôznych

meteorologických situáciách, ktoré najviac ovplyvňujú možnosť vykonávať výcvikové lety a zistiť ktoré faktory je potrebné dôslednejšie sledovať, aby sa minimalizovalo riziko a zabezpečila čo najvyššia úroveň bezpečnosti pri výcviku nových pilotov.

2. Faktory ovplyvňujúce výšku oblačnosti

2.1. Teplý front

Charakteristickým znakom teplého frontu je, že ak je rýchlosť postupu teplého vzduchu vyššia ako studeného, postupne sa na nasunie nad vrstvu studeného vzduchu a tlačí ju vpred. Zo začiatkom jeho vývoja je spojená vrstevnatá oblačnosť typu cirrus a cirrostratus. Pri postupe frontu sa tvorí oblačnosť altostratus a nimbostratus, ktoré sú charakteristické vypadávaním dlhotrvajúcich zrážok. Taktiež vznikajú hmly a nízka oblačnosť. V letnom období sa teplý front prejavuje nasledovne: cez deň zväčša zrážky nevznikajú, avšak v noci, keď sa ochladí, tak zrážky sú intenzívne. (1) (2)

2.2. Studený front

Studený front naopak oproti teplému frontu je obrovská masa studeného vzduchu v tvare klinu zasúvajúceho sa pod teplý, pričom rýchlosť jeho postupu je vyššia. Rozlišujeme dva druhy. Studený front prvého druhu a studený front druhého druhu.

Studený front prvého druhu je podobný teplému frontu a charakterizujú ho menej výrazné prejavy počasia. Usporiadane oblačnosti sa však radí v opačnom smere. Zrážky sa vyskytujú za frontom na rozľahlom území.

Druhým typom je studený front druhého druhu, ktorého charakteristickými vlastnosťami sú intenzívne prejavy počasia

a vysoké rýchlosti pohybu vzduchovej masy. Takisto aj úzky pás zrážok o rozlohe 50-100km pred frontom a masívna búrková činnosť spôsobená oblačnosťou cumulonimbus. Základné usporiadanie oblačnosti v smere pohybu frontu je: cumulonimbus, nimbostratus, altostratus a nakoniec cirrostratus. Začiatočnú a konečnú fázu vývoja sprevádza oblačnosť typu stratocumulus. (1) (2)

2.3. Oklúzny front

Oklúzny typ frontu združuje vlastnosti oboch druhov frontov, teplého i studeného. Je charakteristickým javom pri vzniku tlakovej níže. Typické prejavy oklúzie nie sú tak výrazné ako pri ostatných dvoch druhoch frontu. Spravidla sa pri oklúzných frontoch vyskytuje oblačnosť typu cumulonimbus, rovnako možno pozorovať oblaky druhu altostratus a altocumulus. Rozlišujeme taktiež dva typy oklúzie, teplého frontu a oklúziu studeného frontu.

Teplé typy oklúzneho frontu možno na našom území pozorovať v chladnejších obdobiach roka, kedy môže dochádzať k vypadávaniu zrážok na rozsiahlom území.

Studené typy oklúzneho frontu v letnom polroku, ktoré majú za následok výskyt búrkovej činnosti a v noci môžu byť pozorované hmly. (1) (2)

2.4. Cyklóna

Priaznivé podmienky na vznik tlakovej níže vytvára studený front. Izobary sa zriedia blízko osi tlakovej brázd a v tomto mieste vzniká stred cyklóny. Najnižší tlak v tlakovej níži je v strede a smerom k vonkajším okrajom sa postupne zvyšuje, v miernych zemepisných pásmach koreluje tlak od 950 do 1030 hPa. Prúdenie v cyklóne na severnej pologuli smeruje proti smeru hodinových ručičiek. Ku tvorbe oblačnosti so zrážkovým potenciálom dochádza smerom k stredu tlakovej níže vplyvom špirálovitých výstupných prúdov. Rozmery tlakovej níže bývajú spravidla 100 – 3000km v priemere a 15 – 20km do výšky. (3)

2.5. Anticyklóna

Opakom cyklóny je tlaková výš, charakteristická vyšším tlakom v jej strede s postupným poklesom smerom od neho. Prúdenie v jej vnútri je na severnej pologuli v smere hodinových ručičiek, a teda opakom prúdenia v cyklóne. Charakteristické zostupné prúdenie od stredu nevytvára priaznivé podmienky pre vznik oblačnosti, preto je výskyt oblačnosti v anticyklóne nízky. Rozmerovo sú podobné tlakovej níži, od 100 po 3000km v priemere a vertikálny rozmer činí 15 – 20km.

3. Oblačnosť, vznik, charakteristika

Oblačnosť predstavuje pre leteckú prevádzku značné riziko. Najviac obmedzujúca je spravidla nízka oblačnosť, ktorá priamo vplyva na bezpečnosť vzletu a pristátia, preto sa letiskové správy o počasí zameriavajú z hľadiska oblačnosti predovšetkým na tento druh a informujú o výške základne. Základňu nízkej oblačnosti predstavujú dve základné vrstvy a popierajú preto teoretické podklady jej vzniku, ktoré vravia o vzniku základne pri teplote rosného bodu na hladine kondenzácie. Nejedná sa o presne vyčlenenú hranicu, práve naopak, skladá sa z vrstvy dymna, ktoré siaha od kondenzačnej hladiny po fyzicky viditeľnú

časť oblaku a prechodnej vrstvy predstavujúcej časť oblaku od konca vrstvy dymna po najhutnejšiu časť základne oblaku. Vytvorená podoblačná vrstva dosahuje určitú hrúbku, ktorá závisí od typu oblačnosti, pohybuje sa od 20m pri vrstevnatokopovitých, do 200m pri vrstevnatých typoch oblakov. Práve podoblačná vrstva má výrazný vplyv na dohľadnosť pri pristávaní. (1) (2)

Jednotlivé typy oblačnosti vznikajú pri rozličných podmienkach v atmosfére. Nestabilné vzduchové hmoty charakterizujú oblačnosť typu Cu a Cb, naopak pri stabilných sú reprezentatívnym druhom oblaky St a Sc. Pri teplých a studených frontoch sa vyskytujú oblaky typické pre tieto javy. (1) (2)

3.1. Druhy oblakov

Oblaky rozdeľujeme na oblaky vysoké, stredné a nízke, ďalej ich možno rozdeliť do základných desiatich druhov. Častokrát však nemožno oblaky úplne rozlíšiť z dôvodu presahu cez viacero vrstiev atmosféry. Rovnako závisí aj od ročného obdobia, kedy sa výška základne u niektorých oblakov môže líšiť, vtedy by sme ich zaradili skupín s rôznou základňou. (3) (4)

3.1.1. Cirrus

Vzhľad oblaku môžeme charakterizovať ako oblak s vláknitou štruktúrou bielej farby, pooddeľovanej od seba. Netvorí sa v ňom zrážky, keďže sa nachádza vo výškach od 6 do 12 km, a teda vplyvom nízkej teploty pohybujúcej sa od -30 do -85 stupňov Celzia je tvorený ľadovými kryštálkami. Cirri nie sú zastúpené na celej oblohe, naopak pokrývajú len určitú časť. Z hľadiska leteckej dopravy môžu vytvárať slabú námrazu pri prechode týmto typom oblaku. Vznikajú z oblačnosti druhu cirrocumulus pôsobením vetra. (3) (4)

3.1.2. Cirrocumulus

Podobne ako cirrus je zložený prevažne z ľadových kryštálikov, ale môže obsahovať aj prechladené kvapky vody, ktoré keď zamrznú, oblak prekonvertuje na cirrostratus. Čas od času môžu tieto oblaky produkovať snehové zrážky alebo virgu. Pri výskyte na oblohe v letných mesiacoch môže Cc signalizovať výskyt búrok. Cirrocumuly sú súčasťou teplých frontov v ich počiatkovej fáze, z čoho vieme vyčítať príchod oblačnosti a začiatok zrážkovej činnosti a zmenu počasia v intervale od 5 do 10 hodín. (3) (4)

3.1.3. Cirrostratus

Je posledným charakteristickým typom oblakov vysokých základní bieleho sfarbenia, tenkej vláknitej alebo hladkej štruktúry. Na rozdiel od oblakov typu cirrus a cirrocumulus pokrýva celú plochu oblohy. Môže konvertovať na oblak druhu altostratus. Naopak, ak oblak degraduje, ide o rozpad frontu a prejavy počasia budú viesť k mrholeniu. V niektorých prípadoch sa vytvorí z pôvodnej oblačnosti druhu cumulonimbus a môže mať viacero podôb. (3) (4)

3.1.4. Altostratus

Jedná sa už o oblak z kategórie oblakov strednej základne a dosahuje výšku od dvoch do šiestich kilometrov. Je schopný konvertovať na nimbostratus. Nastane to predovšetkým vtedy, keď sa vyskytujú trvalé a dlhotrvajúce zrážky. Altostratus vzniká zo stabilnej rozmernej vzduchovej hmoty, ktorá je stabilná, nasýtená vodnou parou, ktorá neskôr skondenzuje. Obsahom oblaku sú vodné kvapky aj ľadové kryštálky. Sledovať ho môžeme s príchodom teplých alebo oklúzných atmosférických frontov, niekedy sa však vyskytuje ako sprievodný jav aj pri studených frontoch. (3) (4)

3.1.5. Altostratus

Podobne ako altostratus sa radí tento oblak medzi oblačnosť so strednou výškou základne, väčšinou však nevypadávajú z neho zrážky. Skladajú sa buď z vodných kvapiek, ktoré ak vypadávajú, tak možno pozorovať virgu (kvapky nedosahujú zemský povrch), alebo z ľadových kryštálikov pri nízkej teplote. Pri jeho nakopení môžeme vyčítať, že atmosféra je nestabilná, prípadne v lete sa môže blížiť búrková činnosť. Rovnako sa často vyskytuje pri cyklónach, v ich teplých sektoroch. (3) (4)

3.1.6. Stratocumulus

Navonok šedobiely oblak skladajúci sa z viacerých menších častí, ktoré môžu byť prepojené, patrí do oblačnosti z kategórie nízkej oblačnosti. Môže sa nachádzať stovky metrov až dva kilometre nad povrchom. Pravidelne pozorujeme jeho vznik z oblačnosti typu cumulus pri prudkom miešaní vzduchovej hmoty za dostatočnej vlhkosti. Prispieva k udržaniu teploty v blízkosti zemského povrchu, kedy radiačné žiarenie ohrieva vzduchovú hmotu medzi povrchom Zeme a oblačnosťou. Pri výskyte stratocumulus castellanus často nastáva konvekcia a instabilita vzduchových hmôt, a tento oblak môže postupne prejsť aj do oblačnosti typu cumulonimbus. (3) (4)

3.1.7. Cumulus

Oblaky typu cumulus sa vyskytujú osamote, majú rovnú základňu tmavej sivej farby a z nej vyrastajú kopy svetlejších farieb, zrážková činnosť sa prevažne nevyskytuje. Tento oblak má množstvo podôb, ako je napríklad cumulus humilis, ktorý sa vyskytuje s prichádzajúcou anticyklónou v letnom období po prejení studeného frontu. Dôležitý ukazovateľ pre letectvo je cumulus congestus, ktorý rastie do veľkých výšok a je ukazovateľom silných výstupných prúdov, neskôr môže konvertovať až na oblačnosť typu cumulonimbus. (3) (4)

3.1.8. Stratus

Opakom kopovitej oblačnosti je práve stratus. Na rozdiel od cumulov je to vrstva šedej farby, z ktorej vypadávajú zrážky typu mrholenia, ľadových ihličiek alebo zrníek, keďže sa jedná o vodnatý oblak z nízkou základňou, ktorá je jednotvárna. Keď sa nachádza blízko pri zemi, tak ho identifikujeme ako hmlu. Vznikať môže z hmly, radiačného ochladzovania alebo prudkým premiešavaním vzduchovej hmoty s vysokou vlhkosťou. Počasie pod súvislým stratom je často veterné, dohľadnosť však môže byť viac ako 10km. Pri zoslabení vetra základňa stratu opäť klesne a vytvorí sa hmla. (3) (4)

3.1.9. Nimbostratus

Nimbostratus sa radí medzi zmiešaný oblaky, pretože vďaka svojmu rozsahu siahajúcemu od spodných vrstiev až do vyšších vrstiev atmosféry obsahuje vodu vo viacerých podobách, či už sú to kvapky alebo ľadové kryštálky. Nemá jasne danú základňu. Čo sa týka dopadu na letectvo, tak nimbostratus je charakteristický silnou námrazou a turbulenciami. Postupné stúpanie teplého vlhkého vzduchu hore atmosférou takisto podmieňuje jeho vznik. Za určitých podmienok sa vo vnútri nimbostratu môže vyskytovať aj cumulonimbus. (3) (4)

3.1.10. Cumulonimbus

Oblačnosť tohto typu je extrémne rozsiahla do výšky atmosféry a veľmi hustá. Značne tmavá základňa oblaku sa nachádza niekoľko sto metrov až 2km nad povrchom. Charakteristický jav pri tomto druhu sú turbulentné stúpajúce a klesajúce prúdy vo vnútri oblačnosti, prívalové husté zrážky, v lete spravidla silný dážď a krúpy, v zime husté sneženie. Dohľadnosť býva takmer nulová a vietor silný a premenlivý. Príchod oblakov cumulonimbus súvisí so studeným frontom druhého druhu. V maximálnom vývojovom štádiu, kedy sa na vrchole oblak „rozlieva“ do strán, zaznamenávame maximálne hodnoty vertikálneho prúdenia a tým pádom aj pre letectvo nebezpečný jav – downburst. (3) (4) (5)

4. **Analýza správ METAR na letisku Žilina pri rozličných poveternostných situáciách**

V tejto časti sa postupne rieši spomínaná analýza správ METAR a synoptických máp v roku 2024 resp. 2025, poskytnutých Slovenským hydrometeorologickým ústavom (SHMÚ), na základe ktorých boli identifikované konkrétne javy spojené s typom oblačnosti resp. výškou základne, teplotou vzduchu a ostatných faktorov na to vplývajúcich. Ako konkrétny príklad boli zvolené tri mesiace v roku, v ktorých bola zanalyzovaná situácia. Mesiac august, ako letný mesiac z dôvodu možného výskytu búrok (z tohto hľadiska najaktívnejší mesiac), preto bol vybraný do analýzy. Ďalej to bude mesiac jesenný – november, pri ktorom sa predpokladá, že bude charakterizovaný chladnejším počasím pred prichádzajúcou zimou, s množstvom zrážok, ktoré pri styku s povrchom lietadla pri nízkych teplotách môžu spôsobovať námrazu, ale hlavne očakávaná nízka oblačnosť a hmla spôsobená vyparovaním vody z rieky v blízkosti letiska Žilina. Tieto očakávané zhoršené podmienky z hľadiska zníženej viditeľnosti znemožňujú vykonanie letov VFR. Posledným mesiacom v analýze bol január, v ktorom sa očakáva premenlivé mrazivé počasie, ku ktorému sa môžu pridať zrážky v podobe sneženia, ktoré môžu skomplikovať vykonávanie výcvikových letov pod visual flight rules. K správam METAR boli zanalyzované synoptické mapy tlakových polí v dvanásť hodinových intervaloch pre uľahčenie identifikácie atmosférických frontov a ich postupu územím SR, tým pádom aj letiska a s tým spojený vývoj oblačnosti v jeho okolí.

4.1. Letisko Žilina

Žilinské letisko z hľadiska geografickej polohy leží 12km západne od železničnej stanice Žilina v katastri obce Dolný Hričov s GPS súradnicami stredu vzletovej a pristávacej dráhy 06, situovanej zo západu na východ, resp. dráhy 24 v opačnom smere, 49°14'00" severnej geografickej šírky a 018°36'49" východnej

geografickej dĺžky. Nadmorská výška letiska činí 311m (1020ft). Leží v povodí rieky Váh, ktorá preteká severne od letiska. Vplyvom výrazného vodného toku je ovplyvňované počasie, menovite tvorba hmly a nízkej oblačnosti spôsobená vyparovaním vody z vodného toku, s tým spojená búrková činnosť pri kumulácii oblačnosti, hlavne v letných mesiacoch. Váh takisto ovplyvňuje aj cirkuláciu atmosféry v miestnej oblasti. Ďalší faktor, ktorý ovplyvňuje miestnu klímu a poveternostné podmienky je blízkosť pohorí. Spomeňme pohorie Javorníky tiahnuce sa na severnej strane, z juhu sú to Súľovské vrchy, juhovýchodne od letiska smerom ďalej na východ sa nachádza najvyššie pohorie – Malá Fatra a uzatvára to Kysucká vrchovina, ktorá sa tiahne od východu postupne na severovýchod. Práve hornatý terén v oblasti letiska prehrievaním svahov napomáha nahromadeniu a tvorbe oblačnosti na náveternej strane hôr, čo je sprevádzané zvýšenou zrážkovou činnosťou a rovnako aj ostatné sprievodné javy sa prejavujú signifikantne. Rovnako ako oblačnosť vzniká, tak na záveternej strane je vplyvom zostupného prúdenia narušaná a postupne sa rozplýva. Fronty postupujúce cez horské prekážky sa narušajú a k ich obnoveniu dochádza až po prekonaní dostatočnej vzdialenosti za prekážkou. Vlnové prúdenie vyskytujúce sa za pohorím je ovplyvnené výškou a tvarom prekážky a charakteru vzduchovej hmoty. Vedie to k tvorbe oblačnosti šošovkového tvaru (lenticularis) a opäť ich sprievodným javom je tvorba hustej oblačnosti na náveternej strane a rotorové prúdenie na záveternej strane. (3) (6)

4.2. Výsledky analýzy

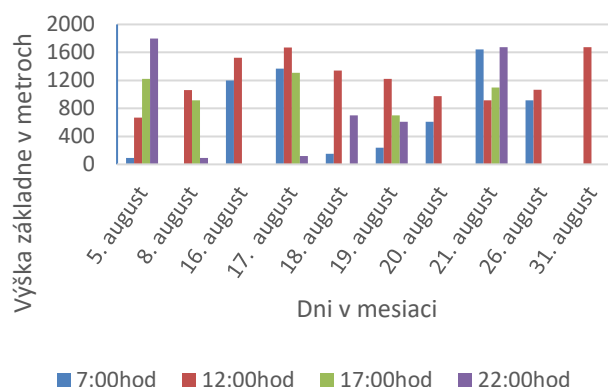
V poslednej časti článku sa zaoberám spracovaním výsledkov analýzy správ METAR, konkrétne pri základni oblačnosti vytvorením grafov výšky základne počas jednotlivých dní v mesiacoch august 2024, november 2024 a január 2025. Následne som vyhodnotil vykonanie bezpečného vzletu, letu a pristátia počas konania výcvikových činností na letisku Žilina na základe výšky základne oblačnosti a dohľadnosti v okolí letiska. Do úvahy sú brané lety za viditeľnosti, teda pod pravidlami VFR a s tým súvisiacimi podmienkami VMC, ktoré možno vysvetliť ako podmienky za dostatočnej viditeľnosti, vzdialenosti od oblaku stanovené predpisom ICAO Annex 2: Rules of the air, ktorý upravuje predpis L2: pravidlá lietania. Pri strednej hladine mora nad 10000ft musí byť letová dohľadnosť minimálne 8km a vzdialenosť od oblačnosti 1,5km horizontálne a 300m vertikálne. Pod strednou hladinou mora ako je 10000ft a zároveň viac ako 3000ft alebo viac ako 1000ft nad terénom, podľa toho, ktorá výška je vyššia, minimálna dohľadnosť musí činiť 5km a viac a vzdialenosť od oblačnosti zostáva rovnako veľká ako v predošlom prípade. Nakoniec, medzi strednou hladinou mora 3000ft a 1000ft alebo výškou nad terénom 1000ft, podľa toho, ktorá z výšok je vyššia musí byť dohľadnosť viac ako 5km a vzdialenosť od oblačnosti 1500m horizontálne a 300m vertikálne. Pri triede vzdušného priestoru F a G musí byť lietadlo mimo oblačnosti a za viditeľnosti zeme. (7) (8) (9) (10)

4.2.1. August 2024

Výška základne oblačnosti počas dní v mesiaci august bola zhrnutá do grafov, kde jeden deň obsahoval maximálne 4 stĺpce, ktoré reprezentovali vývoj základne oblačnosti počas dňa v časoch 7:00, 12:00, 17:00, 22:00 SEČ. Výška základne je udávaná v metroch a vzťahovala sa na najnižšiu oblačnosť v tom čase.

Údaje v grafe reprezentujú číselné údaje spomenuté v kapitole číslo 3 v texte, plus údaje z databázy správ METAR z letiska Žilina poskytnutých SHMÚ. Z grafu možno vyčítať typické počasie pre naše zemepisné šírky, aspoň čo sa týka studených frontov. Ráno bola oblačnosť nižšia, bolo jej menej a postupne na obed začala pribúdať, tvorili sa hlavne oblaky typu cumulus congestus, z

Výška základne oblačnosti pri výskyte studených frontov 8/2024

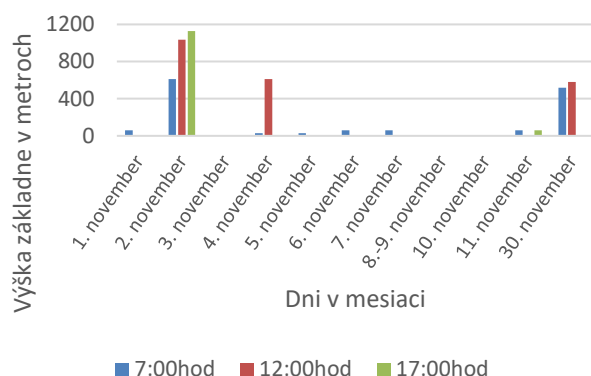


ktorých vznikali vo väčšine prípadov oblaky Cb. Tento vývoj počasia predstavoval vhodné podmienky na lietanie v ranných a obedňajších hodinách. Poobede výskyt búrok a s ním spojené nepriaznivé poveternostné podmienky predstavovali riziko vykonania výcvikových letov. V dňoch nezahrnutých v grafe sa nad územím Slovenska nachádzala prevažne tlaková výš alebo nevýrazné tlakové pole. Tým pádom bol výskyt oblačnosti nepatrný a nepredstavoval riziko a obmedzenie VFR lietania.

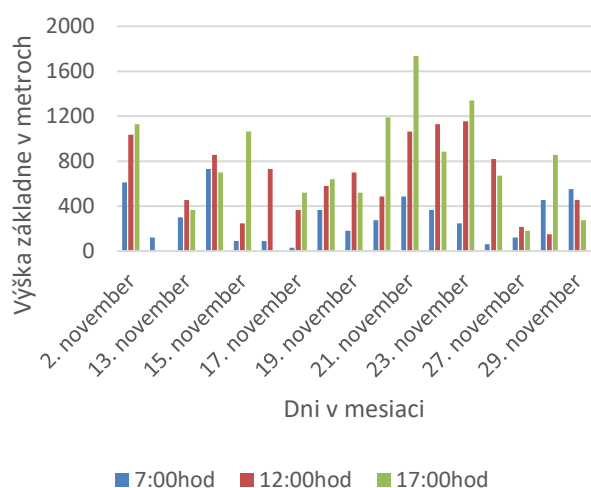
4.2.2. November 2024

Časové rozmedzie pozorovania bolo zredukované, nakoľko dĺžka dňa nepresahuje sedemnástu hodinu a teda vykonanie letov VFR by neskôr nebolo aj tak možné. Rovnako ako pri mesiaci august, grafy poukazujú na výšku základne oblačnosti pri vybraných poveternostných situáciách. Z prvého grafu (obrázok 8) možno usúdiť, že oblačnosť sa na jeseň pri tlakovej výši tvorila prevažne s príspevom orografie. Konkrétne sa jedná o nízku oblačnosť, ktorá vznikala vyparovaním sa vody z rieky Váh. Nabrala podobu hmly alebo dymna, ktorá pri nízkych teplotách námrzala. Rovnako pri vysokej vlhkosti vzduchu sa mohla tvoriť námraza na povrchu lietadiel. Niekedy oblačnosť nevznikala vôbec resp. vyskytovala sa len v ranných alebo večerných hodinách. Iná situácia nastala pri presune frontov cez naše územie (obrázok 9). Z grafu možno pozorovať postup základne oblačnosti do väčších výšok hlavne pri teplých frontoch. Pri studenom fronte, spojenom zväčša s cyklónou, sa oblačnosť držala pomerne nízko pri zemi a v rovnakých výškach aj niekoľko po sebe nasledujúcich dní. Práve pri výskyte oblačnosti blízko pri zemskom povrchu sa znižovala dohľadnosť vo väčšine prípadov pod 5km a častokrát bola znížená aj samotná dráhová dohľadnosť. Kompletne prekrytie oblohy spojené s nízkou teplotou a možným vznikom námrazy tak absolútne znemožnilo vykonanie výcvikových letov VFR.

Výška základne oblačnosti pri anticyklóne 11/2024



Výška základne oblačnosti pri výskyte frontov 11/2024

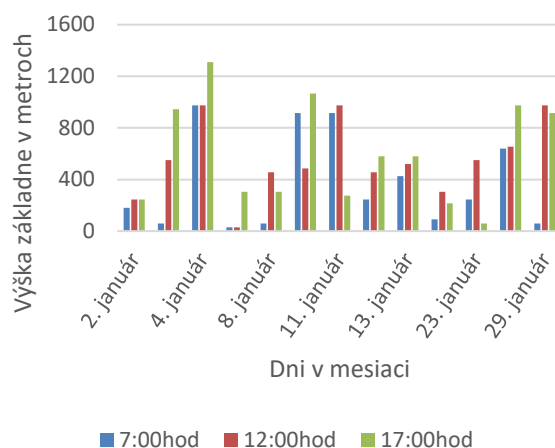


4.2.3. Január 2025

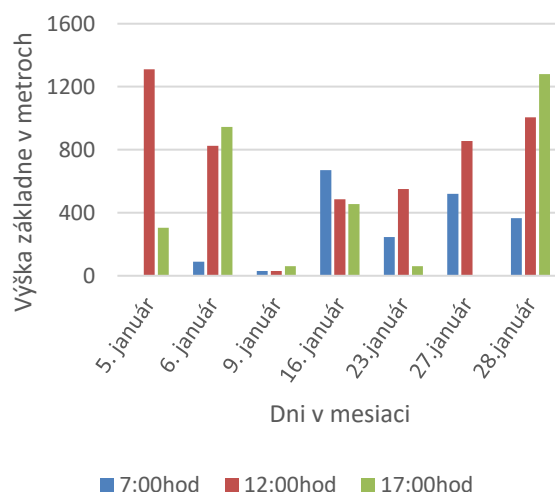
V grafoch za január 2025 je rovnako ako v predošlých dvoch prípadoch uvedená výška základne najnižšie položenéj oblačnosti. Časy zaznamenané v grafe sú tri – 7:00, 12:00, 17:00 SEČ. Štvrtý čas bol irelevantný, keďže dĺžka dňa v januári nepresahovala 17:00, preto v grafe nefiguruje. Mesiac január predstavoval vo vzorke analýzy najplodnejší mesiac, čo sa týka výskytu oblačnosti. Navyše oblačnosť prakticky nezmizla z oblohy. Prevládali studené a oklúzne fronty, ktoré v prvej tretine mesiaca priniesli zrážky v podobe sneženia. Navyše nad oblačnosťou uvedenou v grafe sa nachádzala ďalšia vrstva oblačnosti, ktorá prekryvala kompletne celú oblohu. Znížená dohľadnosť bola samozrejmosťou. Častokrát kolísala okolo úrovne troch kilometrov a veľmi rýchlo sa menila. Jasné počasie sa vyskytlo len v čase, keď sa bezprostredne nad našim územím rozprestieral stred tlakovej výše. Pri tlakovej níži a postupe frontov cez naše územie mala oblačnosť najnižšiu základňu a pretrvávala v takmer rovnakej výške počas celého trvania dňa. Možno to jasne vidieť na grafe napr. siedmeho, ôsmeho a deviateho januára. Neustálym prechodom frontov našim

územím spojených s vysokou vlhkosťou, aj s prispením blízkosti rieky Váh, boli vytvorené priaznivé podmienky pre vznik oblačnosti a jej udržanie sa nad letiskom. Pravidelným javom v tomto mesiaci boli ranné hmly a dymná, ktoré ešte viac napomáhali k zníženiu dohľadnosti. Možno vyvodiť záver, že mesiac január bol z hľadiska výcviku pilotov najnepriaznivejší zo všetkých skúmaných mesiacov.

Výška základne oblačnosti pri výskyte studených a oklúzných frontov 1/2025



Výška základne oblačnosti pri výskyte teplých frontov 1/2025



Záver

Cieľom tohto článku bolo analyzovať výšku základne oblačnosti na Letisku Žilina pri rôznych poveternostných situáciách, najmä v súvislosti s bezpečnosťou výcvikových letov vykonávaných podľa pravidiel VFR. Vychádzalo sa pritom z údajov správ METAR

a synoptických máp poskytnutých Slovenským hydrometeorologickým ústavom (SHMÚ) za vybrané mesiace – august, november 2024 a január 2025. Na základe vykonanej analýzy možno konštatovať, že výška základne oblačnosti významne kolíše v závislosti od typu atmosférického frontu, tlakového útvaru a ročného obdobia. V letných mesiacoch bol častý výskyt kopovitej oblačnosti s potenciálom pre vznik búrok, ktoré síce mali rýchly priebeh, no predstavovali značné riziko pre bezpečnosť letov. V zimných a jesenných mesiacoch sa zas preukázala vyššia pravdepodobnosť výskytu nízkej oblačnosti, hmiel a námrazy, čo často znemožňovalo vizuálne lety a viedlo k prerušeniu výcviku. Analýza potvrdila, že sledovanie výšky základne oblačnosti a súvisiacich meteorologických javov je nevyhnutné nielen pre plánovanie letovej prevádzky, ale aj pre ochranu zdravia a života účastníkov výcviku. Správna interpretácia meteorologických údajov dokáže včas upozorniť na nepriaznivé podmienky, čím sa výrazne zvyšuje bezpečnosť celého procesu výučby. Na záver možno odporučiť pokračovať v podrobnejšom sledovaní dlhodobých trendov, rozšíriť analýzy na ďalšie letiská a porovnať vývoj oblačnosti v závislosti od geografických a klimatických špecifik danej oblasti. Takéto výstupy môžu byť prínosom nielen pre výcvikové centrá, ale aj pre leteckých meteorológov a riadiace orgány civilného letectva.

Referencie

1. **NEDELKA, Milan.** *Letecká Meteorológia II*. Bratislava : Alfa, 1982.
2. **ZVEREV, Alexej Semionovič.** *Synoptická meteorológia*. Bratislava : Alfa, 1986.
3. **Krollová, Sandra.** *Meteorológia v leteckej doprave*. Žilina : Žilinská univerzita, 2014.
4. **DVOŘÁK, Petr.** *Letecká meteorologie. Učebnice pilota 2022*. Cheb : Svět křídél, 2022, s. 87-160.
5. **SKYBRARY.** Visual meteorological conditions. [Online] <https://skybrary.aero/articles/visual-meteorological-conditions-vmc>.
6. —. Visual Flight Rules. [Online] <https://skybrary.aero/articles/visual-flight-rules-vfr>.
7. —. EU-OPS. [Online] <https://skybrary.aero/articles/eu-ops>.
8. —. Cumulonimbus. [Online] <https://skybrary.aero/articles/cumulonimbus-cb>.
9. **DVOŘÁK, Petr.** *Letecká meteorologie*. Cheb : Svět křídél, 2017.
10. **Atmosférický front [online].** Encyclopaedia Beliana, ISBN 978-80-89524-30-3. [cit. 2025-03-01]. [Online] <https://beliana.sav.sk/heslo/atmosfericky-front>.
11. **Slovenský hydrometeorologický ústav.** *METAR_Zilina*. 2025.

12. **LETOVÉ PREVÁDZKOVÉ SLUŽBY SLOVENSKEJ REPUBLIKY.** ICAO mapa Letiska Žilina. [Online] https://aim.lps.sk/eAIP/eAIP_SR/AIP_SR_EFF_20MAR2025_amdt/pdf/aip/LZ_AD_2_LZZI_2-1_en.pdf.
13. **Official Journal of the European Union.** COMMISSION REGULATION (EC) No 859/2008. [Online] 20. August 2008. <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/818.pdf>.
14. **Slovenský hydrometeorologický ústav.** Bulletin: meteorológia a klimatológia 8/2024. [Online] August 2024. https://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/KMIS/publikacie/1727846496_Bulletin_08_2024_prac_ver.pdf.
15. —. Bulletin: meteorológia a klimatológia 11/2024. [Online] November 2024. https://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/KMIS/publikacie/1736412513_Bulletin_11_2024_prac_ver.pdf.
16. —. Bulletin: meteorológia a klimatológia 1/2025. [Online] Január 2025. https://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/KMIS/publikacie/1741166779_Bulletin_01_2025_prac_ver.pdf.
17. **Letecká informačná služba Slovenskej Republiky.** AIP Letecká Informačná Príručka . [Online] https://aim.lps.sk/eAIP/eAIP_SR/AIP_SR_EFF_20MAR2025_amdt/html/LZ-frameset-sk-SK.html.



VERTIKÁLNE DOHODY EÚ O LETECKEJ DOPRAVE A ICH PRÍNOS

Michal Chlebak
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Alena Novák Sedláčková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This paper examines the role of multilateral and bilateral air transport agreements concluded by the European Union in shaping the international aviation position of the Slovak Republic. It explores how EU membership has facilitated access to global markets while also imposing regulatory limitations that affect Slovakia's ability to act independently. The paper highlights the challenges Slovak aviation faces, such as limited global connectivity and barriers to exporting advanced aerospace technologies. It further discusses strategic opportunities for Slovakia, particularly the potential for expanded cooperation with China and Canada. The findings suggest that proactive engagement in EU policymaking, modernization of export frameworks, and strengthening international partnerships are essential for Slovakia to enhance its competitiveness and secure a more prominent role in global aviation.

Keywords

Open sky agreement, European union, Slovak republic, bilateral agreements, multilateral agreements, aviation law

1. Úvod

Letecká doprava sa radí medzi najdynamickejšie oblasti svetového hospodárstva a jej rast je podmienený efektívnym a predvídateľným medzinárodným právnym rámcom. Prístup dopravcov na zahraničné trhy, regulácia leteckej prevádzky a ochrana práv cestujúcich sú upravované prostredníctvom medzinárodných dohôd, ktoré zohrávajú zásadnú úlohu pri formovaní globálneho trhu civilného letectva. V kontexte Slovenskej republiky, ktorá nadobudla nezávislosť v roku 1993, bolo v prvotnej fáze nevyhnutné budovať sieť bilaterálnych dohôd o leteckej doprave, aby bolo možné zabezpečiť medzinárodné letecké spojenie a umožniť rozvoj domáceho letectva.

Bilaterálne dohody uzatvárané samostatne Slovenskou republikou boli v mnohých prípadoch charakteristické určitými obmedzeniami. Stanovovali pevné kvóty na počet letov, určenie dopravcov, ktorí mohli služby vykonávať, a presne definovali trasy a frekvencie letov. Tieto obmedzenia vytvárali prirodzené bariéry pre rast leteckého trhu a znižovali flexibilitu slovenských dopravcov pri adaptácii na meniace sa potreby trhu.

Vstup Slovenska do Európskej únie v roku 2004 znamenal zásadnú zmenu paradigmy. Slovenská republika sa stala súčasťou jednotného európskeho leteckého trhu, v rámci ktorého došlo k prechodu od systému individuálnych bilaterálnych dohôd na režim multilaterálnych vertikálnych dohôd. Tieto dohody, uzatvárané Európskou úniou ako celkom, zabezpečili slovenským dopravcom jednotný a nediskriminačný prístup na trhy tretích krajín, čím sa vytvorili nové príležitosti na rozvoj a expanziu.

Hlavným cieľom tohto článku je analyzovať proces prechodu od bilaterálnych k multilaterálnym dohodám v oblasti leteckej dopravy, identifikovať prínosy a výzvy, ktoré tento prechod priniesol Slovenskej republike, a zhodnotiť širšie hospodárske a

regulačné dôsledky vertikálnych dohôd na slovenský letecký sektor.

2. Teoretické východiská vertikálnych dohôd

Vertikálne dohody Európskej únie o leteckej doprave predstavujú kľúčový nástroj liberalizácie trhu a integrácie členských štátov do globálnej leteckej siete. Ich hlavnou charakteristikou je vytvorenie jednotného právneho rámca, ktorý garantuje všetkým dopravcom členských štátov EÚ rovnaké podmienky pri prístupe na trhy tretích krajín. Týmto prístupom sa odstrániť nutnosť individuálneho vyjednávania medzi každým členským štátom a tretími krajinami, čím sa eliminovali asymetrie a posilnila sa vyjednávacía pozícia EÚ ako celku [1].

Z historického hľadiska vznikla potreba vertikálnych dohôd v dôsledku rastúcej globalizácie trhu leteckej dopravy, ktorá od druhej polovice 20. storočia kladla čoraz vyššie nároky na flexibilitu, kapacitnú dostupnosť a právnu predvídateľnosť v oblasti medzinárodnej prepravy. Tradičné bilaterálne dohody, ktoré boli dominantnou formou regulácie vzťahov v letectve od podpisu Chicagského dohovoru v roku 1944, začali byť postupne vnímané ako prekážka pre dynamický rozvoj trhu. Boli totiž často charakterizované rôznorodými obmedzeniami týkajúcimi sa počtu dopravcov, cien leteniek, kapacitných limitov a vlastníckych požiadaviek, čo brzdilo hospodársku súťaž a inovácie [2].

Cieľom vertikálnych dohôd bolo preto odstrániť tieto historicky podmienené bariéry a vytvoriť podmienky pre vznik otvoreného, konkurencieschopného a nediskriminačného medzinárodného leteckého trhu. Dohody umožňujú voľné určenie trás, frekvencií a cien, liberalizujú podmienky pre vstup na trh vrátane možnosti viacerých dopravcov a zároveň zabezpečujú harmonizáciu regulačných požiadaviek v oblasti bezpečnosti, ochrany životného prostredia a práv cestujúcich. Osobitnú pozornosť si zasluhuje aj aspekt vlastníckych práv, kde vertikálne dohody v

niektorých prípadoch umožňujú dopravcom z členských štátov investovať do dopravcov v tretích krajinách a naopak [3].

Najvýznamnejšími príkladmi vertikálnych dohôd, ktoré ovplyvnili aj postavenie Slovenskej republiky, sú: Dohoda o otvorení nebi medzi EÚ a USA podpísaná v roku 2007, ktorá vytvorila najväčší liberalizovaný trh v histórii civilného letectva; dohoda so Švajčiarskou konfederáciou, ktorá zabezpečila integráciu švajčiarskeho trhu do vnútorného trhu EÚ za podmienok rovnocenných členským štátom; dohody s Marokom a Kanadou, ktoré viedli k otvoreniu trhov v severnej Afrike a Severnej Amerike pre európskych dopravcov; a napokon najnovšie uzavreté dohody s Katarom, ktorých cieľom je posilniť prepojenie s regiónom Blízkeho východu.

Význam vertikálnych dohôd pre Slovenskú republiku je obrovský, keďže v minulosti bol prístup slovenských dopravcov na vzdialenejšie trhy veľmi limitovaný nielen technickými možnosťami, ale predovšetkým právnymi bariérami. Vstup do multilaterálnych dohôd zabezpečil slovenským dopravcom rovnocenný prístup k hlavným globálnym leteckým uzlom, otvoril nové možnosti pre podnikateľské aktivity a výrazne zjednodušil administratívne a regulačné procesy spojené s medzinárodnou prevádzkou.

Z globálneho pohľadu vertikálne dohody EÚ predstavujú modelový príklad úspešnej liberalizačnej politiky v oblasti dopravy, ktorá dokázala skĺbiť potrebu hospodárskej otvorenosti s udrzaním vysokých štandardov bezpečnosti, ochrany životného prostredia a ochrany spotrebiteľa. Tento prístup sa stal inšpiráciou aj pre iné regióny sveta, kde sa postupne začali objavovať podobné snahy o vytváranie spoločných dopravných priestorov na základe multilaterálnych dohôd.

3. Multilaterálne dohody EÚ v kontexte SR

Vstup Slovenskej republiky do Európskej únie v roku 2004 znamenal zásadný zlom v oblasti regulácie medzinárodnej leteckej dopravy. Prechod zo systému bilaterálnych dohôd na systém multilaterálnych vertikálnych dohôd bol podmienený snahou Európskej únie harmonizovať pravidlá leteckej dopravy vo vzťahu k tretím krajinám a posilniť pozíciu európskych dopravcov na globálnom trhu.

Jedným z hlavných dôvodov, prečo EÚ prebrala kompetencie v oblasti uzatvárania dohôd o leteckej doprave, bola potreba odstrániť diskriminačné praktiky, ktoré vyplývali zo samostatných bilaterálnych dohôd členských štátov. Rozhodnutie Súdneho dvora Európskej únie v prípadoch tzv. „open skies cases“ (rozsudky z roku 2002) potvrdilo, že niektoré časti bilaterálnych dohôd členských štátov s tretími krajinami boli v rozpore s právom EÚ, najmä v oblasti nediskriminácie na základe štátnej príslušnosti [4].

Na základe týchto rozhodnutí začala Európska komisia postupne vyjednávať spoločné multilaterálne dohody, ktoré mali nahradiť existujúce bilaterálne zmluvy. Nové vertikálne dohody zabezpečili všetkým dopravcom členských štátov EÚ rovnaké práva na prevádzku leteckých služieb medzi EÚ a tretími krajinami, bez ohľadu na štátnu príslušnosť dopravcu alebo jeho sídlo v konkrétnom členskom štáte.

Dôležitým krokom v tomto procese bolo podpísanie Dohody o otvorení nebi medzi Európskou úniou a Spojenými štátmi americkými v roku 2007. Táto dohoda odstránila prakticky všetky obmedzenia týkajúce sa počtu dopravcov, destinácií, frekvencií letov a cien leteniek medzi EÚ a USA. Okrem tejto dohody boli postupne uzavreté aj ďalšie významné multilaterálne dohody, napríklad so Švajčiarskom (1999, upravená 2002), s Marokom (2006), s Kanadou (2009) a najnovšie s Katarom (2021) [5].

Pre Slovenskú republiku mal tento prechod zásadný význam. Slovenskí dopravcovia získali prístup na trhy, ktoré boli predtým dostupné iba cez komplikované bilaterálne rokovania, a ktoré často obsahovali množstvo obmedzení. Napríklad pred prijatím vertikálnych dohôd bolo pre slovenské letecké spoločnosti veľmi náročné získať práva na priame lety do Severnej Ameriky alebo severnej Afriky. Vďaka multilaterálnym dohodám uzavretým EÚ sa tento prístup stal automatickým a bez diskriminačných prekážok.

Proces implementácie multilaterálnych dohôd si vyžadoval aj legislatívne zmeny na vnútroštátnej úrovni. Slovenská republika musela prijať legislatívne akty, ktoré zabezpečili zosúladenie národných predpisov s právom EÚ, predovšetkým v oblasti bezpečnosti letovej prevádzky, ochrany práv cestujúcich, ochrany pred nelegálnymi praktikami v hospodárskej súťaži a environmentálnej zodpovednosti leteckých dopravcov.

Výsledkom týchto zmien bolo nielen posilnenie právnej istoty slovenských dopravcov a cestujúcich, ale aj zvýšenie atraktivity Slovenskej republiky ako leteckej destinácie v očiach zahraničných leteckých spoločností. Slovenské letiská sa tak stali súčasťou širšej európskej siete, ktorá profitovala z liberalizácie a harmonizácie pravidiel v rámci spoločného trhu EÚ.

4. Komparácia postavenia SR v bilaterálnych a multilaterálnych dohodách

V posledných dvoch desaťročiach prešla Slovenská republika výraznou premenou v oblasti medzinárodnej leteckej dopravy. Táto transformácia sa najvýraznejšie prejavuje na posune od tradičných bilaterálnych dohôd smerom k moderným multilaterálnym rámcom, ktoré vychádzajú z európskej integrácie a konceptu tzv. otvoreného neba. Bilaterálne zmluvy, ktoré Slovensko uzatváralo najmä pred vstupom do Európskej únie, vychádzali zo schémy reciprocity medzi dvoma štátmi a často obsahovali viaceré obmedzenia – od presne určených dopravcov, cez povolené trasy, až po kapacitné limity či vlastnicke požiadavky.

Tieto zmluvy síce vytvárali základ pre cezhraničnú leteckú prevádzku, no zároveň obmedzovali flexibilitu dopravcov a vyžadovali zdĺhavé diplomatické vyjednávania pri akejkoľvek úprave. V prípade Slovenska to znamenalo výrazne obmedzené možnosti expanzie, zložité vstupy na nové trhy a nedostatočný priestor na efektívnu konkurenciu s väčšími hráčmi na globálnom trhu. Obzvlášť výrazné to bolo v porovnaní s členskými štátmi, ktoré už boli integrované do jednotného európskeho leteckého priestoru.

Vstup Slovenska do Európskej únie v roku 2004 preto predstavoval zásadný zlom. Automatickým zapojením do multilaterálnych dohôd, ktoré EÚ uzatvára ako celok s tretími

krajinami (napr. s USA, Kanadou, Švajčiarskom či Marokom), sa slovenským dopravcom otvorili dvere na globálne trhy bez potreby individuálneho diplomatického úsilia. Nový právny rámec zabezpečil rovnaké podmienky pre všetkých dopravcov z členských štátov EÚ – bez ohľadu na ich veľkosť či geografické postavenie – a vytvoril tak predpoklady pre spravodlivú hospodársku súťaž.

Multilaterálne dohody EÚ priniesli aj kvalitatívne zmeny v samotnom obsahu zmlúv. Oproti technicky zameraným bilaterálnym dokumentom obsahujú rozsiahle časti venované právam cestujúcich, ochrane osobných údajov, transparentnosti cien či environmentálnym štandardom. Inštitucionálne zázemie týchto dohôd je rovnako výrazne posilnené – v podobe spoločných výborov, právne záväzných mechanizmov riešenia sporov a koordinačných fór, ktoré umožňujú rýchlejšiu reakciu na zmeny v trhovom prostredí.

Pre Slovenskú republiku znamená členstvo v tomto systéme nielen vyššiu právnu predvídateľnosť, ale aj možnosť aktívne ovplyvňovať podobu budúcich dohôd, čím sa výrazne zvyšuje jej medzinárodná váha. Aj keď SR nedisponuje silným národným dopravcom, profituje z integrácie do systému prostredníctvom silných kompetencií v oblasti vývoja technológií, výcviku odborného personálu, výskumu a údržby lietadiel. Možnosť vstúpiť do širšieho trhu bez diskriminačných obmedzení tak podporuje nielen konkurencieschopnosť slovenského leteckého priemyslu, ale aj jeho dlhodobú udržateľnosť v prostredí globálnej konkurencie.

5. Dopady vertikálnych dohôd na Slovenskú republiku

Implementácia multilaterálnych vertikálnych dohôd Európskej únie mala pre Slovenskú republiku zásadný vplyv v niekoľkých kľúčových oblastiach. Vstup do systému vertikálnych dohôd znamenal pre slovenské civilné letectvo otvorenie nových trhov, zvýšenie konkurencieschopnosti, liberalizáciu tarifnej politiky a zjednodušenie regulačných procesov. Výsledky tohto prechodu sú pozorovateľné tak na úrovni slovenských dopravcov, ako aj na úrovni cestujúcich, letísk a celej ekonomiky [6].

Jedným z najvýraznejších prínosov vertikálnych dohôd bolo zjednodušenie prístupu slovenských leteckých spoločností na trhy tretích krajín. Dopravcovia získali právo vykonávať pravidelné aj charterové lety do destinácií, ktoré boli predtým dostupné len cez zložité bilaterálne rokovania. Prístup k trhom USA, Kanady, severnej Afriky či Blízkeho východu umožnil slovenským aerolíniám plánovať nové linky, rozširovať sieť destinácií a pružnejšie reagovať na dopyt cestujúcich aj nákladných klientov (cargo) [6].

Liberalizácia prístupu na trh priniesla aj nárast konkurencie v oblasti osobnej dopravy. Na slovenských letiskách sa zvýšil počet zahraničných dopravcov, ktorí začali ponúkať priame lety z Bratislavy, Košíc či Popradu do európskych aj mimoeurópskych destinácií. Tento nárast konkurencie mal za následok zníženie cien leteniek, pričom podľa štatistických údajov poklesli priemerné ceny na viacerých významných linkách o 20 až 30 percent v priebehu prvých desiatich rokov po vstupe do EÚ [7]. Cestujúci tak získali širšie možnosti výberu dopravcov, lepšie služby a vyššiu dostupnosť leteckých spojení.

Okrem cenových efektov prispeli vertikálne dohody aj k zvýšeniu kvality poskytovaných služieb. V dôsledku harmonizácie regulačných požiadaviek museli všetci dopravcovia pôsobiaci na slovenskom trhu dodržiavať prísne normy bezpečnosti stanovené Agentúrou Európskej únie pre bezpečnosť letectva (EASA) a pravidlá ochrany práv cestujúcich, ktoré boli zakotvené v nariadení (ES) č. 261/2004. Tým sa zvýšila úroveň ochrany spotrebiteľa a dôvera verejnosti v leteckú dopravu ako bezpečný a spoľahlivý spôsob prepravy [8].

Vertikálne dohody mali vplyv aj na infraštruktúrny rozvoj letísk. Zvýšený objem cestujúcich a nákladov vytvoril tlak na modernizáciu a rozšírenie kapacít letísk, čo viedlo k investíciám do terminálov, bezpečnostných systémov a navigačných technológií. Letiská v Bratislave, Košiciach a ďalších mestách postupne modernizovali svoje vybavenie, aby dokázali efektívne zvládať rastúci počet medzinárodných letov a požiadavky na vyššiu kvalitu služieb.

Významný dopad multilaterálnych dohôd bol zaznamenaný aj v oblasti nákladnej dopravy. Slovenskí dopravcovia a logistické spoločnosti získali prístup k novým trhom a mohli flexibilnejšie využívať leteckú nákladnú dopravu v rámci globálnych dodávateľských reťazcov. Otvorenie trhu pre prepravu tovaru umožnilo zníženie prepravných nákladov a zrýchlenie dodávok, čo malo pozitívny efekt na exportno-importné aktivity Slovenskej republiky [9].

Napriek týmto pozitívnym výsledkom však vstup do liberalizovaného trhu vytvoril aj nové výzvy. Slovenskí dopravcovia museli čeliť silnej konkurencii veľkých zahraničných spoločností s vyššou kapitálovou silou, rozsiahlejšími flotilami a etablovanými značkami. To si vyžadovalo zvýšené investície do modernizácie lietadlového parku, zefektívnenie prevádzky a zlepšenie marketingových stratégií, aby si slovenské letecké spoločnosti dokázali udržať svoje trhové podiely.

6. Postavenie SR v medzinárodných dohodách

Postavenie Slovenskej republiky v oblasti medzinárodnej leteckej dopravy prešlo od roku 1993 zásadnou premenou, ktorá súvisela so zmenou charakteru dohôd, na základe ktorých slovenskí dopravcovia získavali prístup na trhy tretích krajín. Po vzniku samostatnej Slovenskej republiky sa zabezpečenie medzinárodnej leteckej prevádzky riešilo prostredníctvom bilaterálnych dohôd, ktorých hlavným znakom bolo obmedzenie počtu dopravcov, frekvencií letov, destinácií a v niektorých prípadoch aj vopred regulovaných cien. Bilaterálne dohody odrážali model vzťahov typický pre 20. storočie, ktorý bol poznačený preferenciou národných dopravcov a obmedzovaním hospodárskej súťaže v letectve.

V rámci bilaterálnych dohôd boli slovenské letecké spoločnosti viazané prísnymi podmienkami a každá zmena v počte letov, destináciách či tarifách podliehala dodatočnému schvaľovaniu regulačnými orgánmi oboch zmluvných strán. Táto rigidita brzdila prirodzený rozvoj leteckého trhu a obmedzovala schopnosť slovenských dopravcov pružne reagovať na meniace sa potreby trhu a na rastúci dopyt cestujúcich a firiem po medzinárodnej mobilite.

Vstup Slovenskej republiky do Európskej únie v roku 2004 a zaradenie do systému multilaterálnych vertikálnych dohôd

znamenal pre Slovensko zásadnú zmenu postavenia v rámci medzinárodného letectva. Na základe týchto dohôd slovenskí dopravcovia získali rovnaké práva ako ostatní dopravcovia členských štátov Európskej únie pri prístupe na trhy tretích krajín. Nový systém zabezpečil voľný prístup bez kvantitatívnych a tarifných obmedzení, čím odstránil diskriminačné bariéry typické pre bilaterálny model.

Výhodou multilaterálnych dohôd bolo tiež to, že slovenskí dopravcovia nemuseli individuálne vyjednávať podmienky vstupu na každý zahraničný trh. Dohody vyrokované EÚ garantovali spoločný rámec práv a povinností, čo zjednodušilo administratívne postupy a umožnilo sústrediť sa na obchodné stratégie a rozvoj nových liniek. Súčasťou nového modelu bolo aj harmonizované uplatňovanie pravidiel v oblasti bezpečnosti, ochrany práv cestujúcich a hospodárskej súťaže, čím sa zvýšila kvalita poskytovaných služieb a dôvera cestujúcich.

Pri komparácii postavenia Slovenskej republiky v bilaterálnych a multilaterálnych dohodách je možné konštatovať, že zatiaľ čo v bilaterálnom modeli bola pozícia slovenských dopravcov obmedzená a závislá od vyjednávacej sily štátu, multilaterálny systém priniesol väčšiu rovnosť príležitostí, vyššiu predvídateľnosť a jednoduchší prístup na globálny trh. Slovenské aerolínie získali práva operovať v širšom spektre destinácií bez potreby individuálnych súhlasov a mohli využívať výhody otvoreného trhu v kombinácii s jednotnými pravidlami ochrany hospodárskej súťaže.

Napriek týmto výhodám treba zároveň upozorniť na riziká spojené so zvýšenou konkurenciou zo strany veľkých zahraničných dopravcov, ktorí disponujú väčším kapitálom, väčšími flotilami a zavedenými značkami. Slovenské letecké spoločnosti sa museli prispôbiť novému prostrediu prostredníctvom inovácií, zvyšovania efektivity a investícií do kvality služieb, aby si udržali konkurencieschopnosť na liberalizovanom trhu.

7. Vyhodnotenie prínosu medzinárodných dohôd pre SR

Medzinárodné dohody o leteckej doprave zohrali v rozvoji slovenského civilného letectva kľúčovú úlohu. Prechod od bilaterálnych dohôd k multilaterálnym vertikálnym dohodám Európskej únie predstavoval zásadnú transformáciu právneho a trhového prostredia, v ktorom slovenskí dopravcovia pôsobia.

V rámci bilaterálnych dohôd, ktoré Slovenská republika uzatvárala samostatne, bolo postavenie slovenských dopravcov limitované množstvom obmedzení a administratívnych prekážok. Hoci tieto dohody zabezpečovali základný prístup na zahraničné trhy, ich obmedzená flexibilita a zložité vyjednávacie procesy často bránili dynamickému rozvoju a rozširovaniu siete destinácií. Slovenské aerolínie museli čeliť rigidným podmienkam, ktoré znížovali ich schopnosť konkurovať väčším zahraničným spoločnostiam.

Zavedenie multilaterálnych vertikálnych dohôd prinieslo zmenu v podobe odstránenia kapacitných, tarifných a prevádzkových obmedzení. Slovenskí dopravcovia získali možnosť operovať lety do tretích krajín za rovnakých podmienok ako dopravcovia zo všetkých ostatných členských štátov Európskej únie. Tento krok výrazne posilnil postavenie Slovenskej republiky na globálnom

trhu leteckej dopravy a zvýšil atraktivitu slovenských letísk ako východiskových bodov pre medzinárodné lety.

Medzi konkrétnymi prínosmi patrí predovšetkým zvýšenie počtu destinácií dostupných priamo zo slovenských letísk, pokles cien leteniek v dôsledku liberalizácie trhu a zvýšenie kvality poskytovaných služieb vďaka harmonizovaným bezpečnostným a prevádzkovým štandardom. Cestujúci zo Slovenska tak profitovali zo širších možností cestovania a lepšej ochrany svojich práv, čo v konečnom dôsledku prispelo aj k rastu turizmu a podpore podnikateľského prostredia.

Na strane slovenských dopravcov však liberalizácia trhu vyvolala potrebu intenzívnejšej modernizácie, zvýšenia efektivity a posilnenia konkurencieschopnosti. Konkurencia zo strany veľkých nadnárodných spoločností priniesla tlak na inovácie, investície do flotíl a zvyšovanie úrovne zákazníckeho servisu. Úspešné uplatnenie na liberalizovanom trhu preto záviselo od schopnosti slovenských spoločností prispôbiť sa novým podmienkam a využiť možnosti, ktoré medzinárodné dohody ponúkli.

8. Návrh rozšírenia spolupráce

Postavenie Slovenskej republiky v oblasti medzinárodnej leteckej dopravy je úzko späté s členstvom v Európskej únii, v rámci ktorej Slovensko vystupuje predovšetkým prostredníctvom zmiešaných dohôd EÚ s tretími krajinami, ako sú USA, Kanada či Maroko. Tento kolektívny prístup posilňuje vyjednávaciu pozíciu členských štátov, avšak obmedzuje možnosť samostatných iniciatív. V prípade absencie záujmu zo strany EÚ pristúpilo Slovensko k bilaterálnym dohodám.

Z pohľadu regulačných kompetencií Slovensko disponuje všetkými potrebnými mechanizmami, pričom Dopravný úrad zabezpečuje vydávanie licencií a dohľad nad bezpečnosťou v súlade s právom EÚ a technickými štandardmi EASA. V praktickej leteckej doprave však Slovensko absentuje ako významný hráč, chýba mu silný národný dopravca a priamych diaľkových liniek je málo. Pridaná hodnota Slovenska sa prejavuje predovšetkým vo výrobe leteckých komponentov, údržbe lietadiel a odbornom vzdelávaní.

8.1. Úprava vývozných práv

Slovenské letecké spoločnosti čelia v oblasti exportu technologických produktov obmedzeniam, ktoré vyplývajú zo spoločnej obchodnej politiky EÚ. Administratívne bariéry a zastarané predpisy spomaľujú vývoz pokročilých technológií na rýchlo rastúce trhy mimo Európy. Zjednodušenie vývozných procesov, modernizácia legislatívy a pružnejší prístup k vývozu sú kľúčové kroky, ktoré by umožnili slovenským firmám posilniť svoju pozíciu na globálnych trhoch v Ázii, Latinskej Amerike a Afrike.

8.2. Rozšírenie spolupráce s Čínou

Rastúce obchodné napätie medzi USA a Čínou vytvára príležitosti pre európske letecké spoločnosti. Zavedenie vysokých ciel na americké produkty viedlo k zníženiu objednávok od spoločností ako Boeing, čo otvára priestor pre európskych výrobcov. Slovenské firmy zapojené do dodávateľských reťazcov Airbusu a iných európskych výrobcov

môžu z tohto vývoja profitovať. Slovensko by malo podporovať rozvoj spolupráce s čínskymi partnermi v oblasti školenia leteckého personálu, údržby lietadiel a dodávok komponentov, pričom je nutné dôsledne vyhodnocovať regulačné a bezpečnostné riziká.

8.3. Potenciál rozšírenia spolupráce s Kanadou

Kanada, ako stabilný partner EÚ v rámci dohody CETA a Dohody o spoločnom leteckom priestore, predstavuje ďalšiu perspektívnu destináciu. Slovenský letecký priemysel by mohol profitovať zo spolupráce v oblasti výroby komponentov, výskumu bezpilotných systémov a ekologických technológií. Chýbajúce priame letecké spojenie medzi Slovenskom a Kanadou limituje rozvoj obchodných a investičných príležitostí. Zriadenie sezónnych alebo charterových liniek by mohlo zlepšiť mobilitu a podporiť rozvoj bilaterálnych projektov.

Vzhľadom na geopolitické zmeny a snahu Kanady diverzifikovať svoje dodávateľské reťazce existuje priestor pre strategické partnerstvá v oblasti udržateľných technológií, ekologických palív a výcviku odborného personálu. Slovensko by malo aktívne budovať väzby prostredníctvom obchodných misií, výskumných projektov a politických iniciatív v rámci EÚ.

9. Diskusia a záver

Analýza vplyvu multilaterálnych a bilaterálnych dohôd Európskej únie na postavenie Slovenskej republiky v oblasti letectva ukazuje, že začlenenie Slovenska do spoločného európskeho trhu prinieslo významné výhody v podobe liberalizácie prístupu na trhy tretích krajín a zjednotenia regulačných štandardov. Vďaka tomu sa slovenským leteckým subjektom otvorili nové príležitosti v oblasti osobnej aj nákladnej dopravy, ako aj v oblasti výroby a technologických riešení.

Napriek týmto pozitívnym trendom však slovenské letectvo čelí viacerým štrukturálnym výzvam. Chýbajúci národný dopravca s výraznejšou medzinárodnou prítomnosťou, obmedzená sieť diaľkových liniek a nízke zastúpenie v kľúčových rozhodovacích procesoch na úrovni EÚ znižujú schopnosť Slovenska plnohodnotne využívať potenciál globálnych leteckých trhov. Rovnako aj administratívne prekážky v oblasti exportu technologických produktov predstavujú významnú bariéru pre lepšie začlenenie slovenských firiem do globálnych dodávateľských reťazcov.

Diskusia ukazuje, že kľúčom k zlepšeniu postavenia Slovenskej republiky je kombinácia viacerých opatrení: efektívnejšie využívanie existujúcich multilaterálnych dohôd, aktívne zapájanie sa do tvorby politiky EÚ, modernizácia legislatívy v oblasti vývozných práv a budovanie strategických partnerstiev mimo tradičných transatlantických väzieb. Príležitosti predstavujú najmä spolupráca s Čínou, kde môže Slovensko profitovať z posilneného dopytu po európskych technológiách, a s Kanadou, kde existujú pevné právne rámce na rozvoj obchodných a technologických väzieb.

Záverom možno konštatovať, že Slovenská republika má v oblasti letectva stabilné základy, ale ich plné využitie si vyžaduje aktívnu štátnu podporu, flexibilné regulačné prostredie a strategické budovanie vzťahov s partnermi mimo EÚ. Iba kombináciou týchto krokov bude možné posilniť postavenie

Slovenska v globálnom leteckom priestore a zabezpečiť trvalo udržateľný rast tohto strategického odvetvia.

Referencie

- [1] https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/international-aviation_en. [Online]. Available: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/international-aviation_en. [Cit. 25 Apríl 2025].
- [2] https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/Overview_of_Regulatory_and_Industry_Developments_in_International_Air_Transport.pdf. [Online]. Available: https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/Overview_of_Regulatory_and_Industry_Developments_in_International_Air_Transport.pdf. [Cit. 25 Apríl 2025].
- [3] https://www.researchgate.net/publication/340443014_The_impact_of_air_transport_market_liberalization_Evidence_from_EU%27s_external_aviation_policy. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/340443014_The_impact_of_air_transport_market_liberalization_Evidence_from_EU%27s_external_aviation_policy. [Cit. 25 Apríl 2025].
- [4] <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/dp201504.pdf>. [Online]. Available: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/dp201504.pdf>. [Cit. 25 Apríl 2025].
- [5] https://www.icao.int/sustainability/Documents/Compendium_FairCompetition/Practices/EU-US_OSA_2007.pdf. [Online]. Available: https://www.icao.int/sustainability/Documents/Compendium_FairCompetition/Practices/EU-US_OSA_2007.pdf. [Cit. 25 Apríl 2025].
- [6] <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/259018/1/v10103-009-0011-x.pdf>. [Online]. Available: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/259018/1/v10103-009-0011-x.pdf>. [Cit. 25 Apríl 2025].
- [7] https://www.researchgate.net/publication/334136714_Market_segmentation_in_air_transportation_in_Slovak_Republic. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/334136714_Market_segmentation_in_air_transportation_in_Slovak_Republic. [Cit. 25 Apríl 2025].
- [8] <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/131/air-transport-market-rules>. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/131/air-transport-market-rules>. [Cit. 25 Apríl 2025].
- [9] <file:///C:/Users/Chlebak/Downloads/129-620-1-PB.pdf>. [Online]. Available: <file:///C:/Users/Chlebak/Downloads/129-620-1-PB.pdf>. [Cit. 25 Apríl 2025].



NOVÉ TECHNOLOGIE VO VŠEOBECNOM LETECTVE

Matej Imriš

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

František Jůn

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The final thesis focuses on the use of new technologies in the field of communication, navigation, and surveillance systems in general aviation. The thesis aims to supplement the study material for the subject Aeronautical Navigation 2, providing the reader with a comprehensive overview of modern systems used in aviation, their development, and functionality. The work focuses on the overview and analysis of current trends in digital communication systems such as Datalink, ACARS, CPDLC, and SATCOM, navigation technologies including Inertial Navigation and Reference Systems (INS, IRS), as well as the Flight Management System (FMS), and surveillance systems such as ADS-B and multilateration. The thesis also includes a historical context of the development of such aviation systems and an overview of the legislative frameworks at international, European, and national levels. As part of the design section of thesis, a proposal was written for the modernization of the aircraft fleet of the University of Žilina, with the aim of upgrading and providing training in accordance with current technological trends.

Keywords

Digital communication, Navigation systems, Surveillance systems, DATALINK

1. Úvod

V posledných rokoch dochádza v oblasti letectva k dynamickému rozvoju technológií, najmä v oblasti digitálnej komunikácie, navigácie a prehľadových systémov. Tieto zmeny už dávno nie sú doménou len komerčnej leteckej dopravy a postupne prenikajú aj do prostredia všeobecného letectva. Dôraz sa kladie na zvyšovanie bezpečnosti, zefektívnenie výcviku pilotov a zjednodušenie prevádzky

S rozvojom technológií však rastie aj potreba aktualizovať učebné materiály, aby reflektovali nové trendy a používané systémy. Vzhľadom na tieto potreby vznikol návrh záverečnej práce, ktorého cieľom je spracovať prehľad moderných technológií v oblasti leteckej komunikácie a dátových systémov. Výsledný materiál má slúžiť ako doplnok pri výučbe predmetu Letecká navigácia 2 na Katedre leteckej dopravy Žilinskej univerzity v Žiline.

Práca sa primárne zameriava na digitálne komunikačné systémy, ako sú Datalink, ACARS, CPDLC a SATCOM. Sekundárne sa venuje aj navigačným a prehľadovým systémom, ktoré s touto problematikou úzko súvisia.

Pri spracovaní boli využité odborné články, publikácie a knižné zdroje. Získané informácie boli starostlivo vybrané, preložené a spracované do podoby vhodnej pre študentov. Okrem teoretického spracovania obsahuje práca aj návrh, ako by mohli byť moderné technológie implementované do výcvikovej leteckej techniky používané na univerzite.

Obsah práce je rozdelený do troch hlavných častí:

- Prvá kapitola sa venuje legislatívnemu rámcu a historickému vývoju komunikačných a navigačných systémov v letectve, od jeho začiatkov až po súčasnosť.
- Druhá kapitola predstavuje samotné moderné technológie. Podrobne opisuje digitálnu komunikáciu (Datalink, ACARS,

CPDLC, SATCOM), základné princípy inerciálnych systémov (INS, IRS) a systém FMS (Flight Management System). Kapitola sa venuje aj prehľadovým technológiám ako ADS-B a multilaterácia, ktoré dnes zohrávajú kľúčovú úlohu aj vo všeobecnom letectve.

- Tretia kapitola sa sústreďuje na praktické využitie týchto systémov v lietadlách Žilinskej univerzity. Analyzuje možnosti dovybavenia lietadiel, aby študenti získali reálnu skúsenosť s modernou avionikou, najmä v oblasti prístrojových letov.

Cieľom práce je vytvoriť prehľadný text, ktorý bude slúžiť ako praktický učebný materiál. Dôraz je kladený na zrozumiteľnosť, prepojenie teórie s praxou a prispôbenie obsahu potrebám študentov letectva.

2. Predpisové požiadavky na COM-NAV

Letecká komunikácia (COM) a navigácia (NAV), v práci označované ako COM-NAV, sú neoddeliteľnou súčasťou bezpečnej, efektívnej a ekonomickej prevádzky letectva. Od počiatkov letectva bolo nevyhnutné zabezpečiť spoľahlivú komunikáciu medzi posádkami lietadiel a riadením letovej prevádzky, ako aj presnú navigáciu počas letu. S rozvojom letectva dochádzalo aj k postupnému vývoju technológií a regulácií v oblasti COM-NAV. Modernizácia COM-NAV systémov priniesla nové technologické možnosti, ale aj právne výzvy, predovšetkým v oblasti bezpečnosti a efektívneho využívania obmedzených zdrojov, ako je napríklad frekvenčné spektrum. Významnú úlohu pri tvorbe regulačných požiadaviek zohrávajú organizácie ako ICAO (International Civil Aviation Organization), EASA (European Union Aviation Safety Agency) a národné letecké úrady, na Slovensku Dopravný úrad Slovenskej republiky. Táto kapitola je rozdelená na historický prehľad vývoja komunikácie a navigácie a prehľad právneho rámca na medzinárodnej, európskej a národnej úrovni.

2.1. Historický vývoj komunikačných a navigačných systémov

Rozvoj komunikačných a navigačných systémov bol kľúčovým faktorom pre zvýšenie bezpečnosti a efektívnosti letectva. Postupný prechod od základných signalizačných metód k rádiovým a satelitným technológiám výrazne zlepšil presnosť navigácie aj koordináciu medzi pilotmi a riadením letovej prevádzky. V tejto časti je hlavný prehľad vývoja systémov COM-NAV vo svete i v Československu.

2.1.1. Historický vývoj komunikačných systémov

Počiatky komunikácie siahajú k vynálezu Morseovej abecedy Samuelom F. Morseom, ktorá našla uplatnenie aj v neskorších navigačných technológiách. Vývoj prenosových zariadení bol predovšetkým podporený aj prácou W. Cooka a Ch. Wheatstona. Chápanie využitia elektromagnetického poľa, ktoré Clarkom Jamesom Maxwellom pochopil, viedlo k vývoju bezdrôtového prenosu, ktorý bol aplikovaný v železničnej, vojenskej a neskôr aj leteckej doprave. [1]

Koncom 19. storočia sa uskutočnili prvé pokusy s rádiovým spojením cez Atlantik, no reálne využitie v letectve prišlo až po zdokonalení rádiotelegrafických zariadení. Na území Československa sa prvé pokusy s rádiotelefóniou v letectve uskutočnili koncom 20. rokov 20. storočia. Letecká spoločnosť ČSA v roku 1933, mala svoje lietadlá vybavené rádiotelegrafickými stanicami a zaradila do posádok aj rádiotelegrafistov. [2]

2.1.2. Historický vývoj navigačných systémov

Základy rádiovej navigácie môžeme sledovať už v 19. storočí výskumom rádiových vĺn Heinrichom Hertzom a Jamesom Clerk Maxwellom. Prvé reálne využitie rádiových vĺn na detekciu kovových objektov, ktoré predstavujú začiatky radaru sa uskutočnilo v 30. rokoch 20. storočia v Spojenom kráľovstve. [3]

V rovnakom období sa rozvíjali aj technológie ako rámové antény a radiogoniometre na určovanie polohy lietadiel trianguláciou. Neskôr sa začali používať NDB (nesmerové majáky) a systémy ako VOR/DME, ktoré umožnili presnejšie smerové vedenie a meranie vzdialenosti. Prechod na moderné navigačné technológie pokračoval v neskorších rokoch, zavedením inerciálnych navigačných systémov (INS) a neskôr satelitnej navigácie pomocou GPS a SBAS, ktoré priniesli revolučnú presnosť v globálnom určovaní polohy. [2], [4], [5], [6]

2.2. Predpisové požiadavky

Spôľahlivé a regulované fungovanie COM-NAV systémov je zabezpečené prostredníctvom právnych noriem na medzinárodnej, európskej a národnej úrovni, ktoré stanovujú technické špecifikácie, bezpečnostné požiadavky a prevádzkové normy.

2.2.1. Medzinárodná legislatívna úprava

Základným dokumentom medzinárodného leteckého práva je Chicagský dohovor (1947), ktorý viedol k založeniu Medzinárodnej organizácie pre civilné letectvo (ICAO). Dôležité sú technické prílohy (Annexy) ICAO, pre naše potreby

predovšetkým Annex 10 (Letecké telekomunikácie) a Annex 11 (Služby riadenia letovej prevádzky), ktoré definujú požiadavky aj na komunikačné a navigačné systémy. [7], [8]

Medzi ďalšie významné dokumenty patrí Doc 8168 (PANS-OPS), ktorý obsahuje odporúčania a postupy pre lety IFR podľa rádio-navigácie a GPS. [9]

2.2.2. Európska legislatívna úprava

Na úrovni Európskej únie sa letecká legislatíva v oblasti COM-NAV riadi predovšetkým nariadeniami a smernicami prijatými Európskou radou a Európskym parlamentom. Organizácie ako EUROCONTROL a EASA zohrávajú kľúčovú úlohu pri harmonizácii bezpečnostných štandardov. [7], [10]

2.2.3. Národná legislatívna úprava

V Slovenskej republike je právny rámec letectva obsiahnutý v Zákone č. 143/1998 Z.z. o civilnom letectve. Dopravný úrad SR vykonáva štátny odborný dozor a vydáva letecké predpisy typu „L“, ktoré zabezpečujú aplikáciu štandardov ICAO a EÚ. [8], [11] Informácie o povinnom vybavení lietadiel sú publikované v AIP SR, najmä v častiach GEN a ENR. [12]

3. Využitie nových technológií vo všeobecnom letectve

V posledných desaťročiach dochádza v oblasti letectva k dynamickému technologickému pokroku, ktorého cieľom je zvýšiť bezpečnosť, efektívnosť a spoľahlivosť leteckej dopravy. Tento trend sa neobmedzuje iba na komerčnú leteckú dopravu, ale čoraz viac zasahuje aj oblasť všeobecného letectva, vrátane výcvikových lietadiel. Moderné technológie v oblasti komunikácie, navigácie a prehľadových systémov sa stávajú kľúčovými nástrojmi na zvyšovanie štandardov v prevádzke lietadiel všeobecného letectva. V tejto kapitole je spracovaný prehľad hlavných inovácií, ktoré nachádzajú uplatnenie v oblasti digitálnej komunikácie, navigačných riešení a prehľadových technológií.

3.1. Digitálna komunikácia

S rastúcimi požiadavkami na bezpečnosť a efektívnosť prevádzky dochádza k zásadnému posunu od tradičnej hlasovej komunikácie k automatizovaným dátovým systémom. Digitálne komunikačné technológie umožňujú spoľahlivý prenos informácií medzi lietadlom a pozemnými stanicami prostredníctvom textových správ, čím znižujú riziko chýb a zvyšujú plynulosť letovej prevádzky.

3.1.1. Datalink

Systém Datalink predstavuje modernú formu výmeny informácií medzi lietadlom a pozemnými systémami prostredníctvom textových správ. V európskom vzdušnom priestore je štandardizovaný na základe siete Aeronautical Telecommunications Network (ATN) a využíva VDL Mode 2 ako hlavný spôsob pre prenos dát. Použitie Datalinku umožňuje efektívne prenášať prevádzkové pokyny a informácie riadenia letovej prevádzky bez zaťaženia hlasových kanálov, pričom prispieva aj k vyššej bezpečnosti a lepšiemu organizačnému toku dát v riadení letov. [13], [14]

3.1.2. ACARS - - Aircraft Communications Addressing and Reporting System

ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) je systém založený na Datalinku, ktorý zabezpečuje prenos širokej škály správ medzi lietadlom a pozemnými stanicami. Tento systém pôvodne využíval len VHF spojenie, no v súčasnosti podporuje aj HF a SATCOM siete, čo umožňuje globálne pokrytie. ACARS slúži na zasielanie technických správ o stave lietadla, letových plánov, meteorologických informácií a ďalších údajov potrebných pre riadenie letu a údržbu lietadla. [15], [16]

3.1.3. CPDLC – Controller–Pilot Data Link Communication

Controller–Pilot Data Link Communication (CPDLC) predstavuje významný pokrok v oblasti riadenia letovej prevádzky. Tento systém umožňuje riadiacim letovej prevádzky a posádkam lietadiel vymieňať si neurgentné strategické správy prostredníctvom štandardizovaných dátových protokolov. CPDLC prispieva k zníženiu zaťaženia hlasových frekvencií, znižuje riziko nesprávneho pochopenia pokynov a umožňuje efektívnejšie riadenie letov, najmä v preťažených vzdušných priestoroch. [15], [17]

Tabuľka 1 Výsledok prehľadu systému CPDLC

Výhody systému CPDLC	Nevýhody/Výzvy systému CPDLC
Zníženie zaťaženia hlasových frekvencií	Zvýšený čas pozornosti na displeje
Zvýšenie kapacity vzdušného priestoru	Odlišný spôsob doručovania správ
Možnosti paralelne vybaviť viacero požiadaviek	Zmeny v postupoch SOP
Zníženie rizika nesprávnej interpretácie správ	Potreba dodatočného výcviku posádok

Zdroj: spracované autorom podľa [18], [19]

3.1.4. SATCOM

Satelitná komunikácia (SATCOM) predstavuje kľúčový prvok zabezpečenia spojenia v oblastiach mimo dosahu tradičných VHF a HF sietí, ako sú oceánske alebo odľahlé oblasti. SATCOM poskytuje nielen možnosť dátovej a hlasovej komunikácie, ale aj služby pre pasažierov, ako je širokopásmové internetové pripojenie počas letu. Systémy SATCOM sú zároveň neoddeliteľnou súčasťou budúcej architektúry leteckej komunikácie, známej ako Future Communications Infrastructure (FCI). Palubné vybavenie na podporu SATCOM komunikácie spravidla pozostáva z viacerých prepojených jednotiek a zabezpečuje nielen dátovú, ale aj hlasovú komunikáciu. V prípade využívania hlasových služieb cez SATCOM je nevyhnutné, aby sa dodržiavali štandardné rádiové postupy, ako cez VHF pásmo, vrátane správnej frazeológie a štandardov. [20] [21]

3.2. Navigačné systémy

Presná a samostatná navigácia je nevyhnutným predpokladom bezpečnej a efektívnej prevádzky lietadiel. Moderné riešenia v tejto oblasti sa sústreďujú na minimalizáciu závislosti od

pozemných navigačných zariadení a na maximalizáciu samostatnosti lietadiel pri určovaní svojej polohy.

3.2.1. Inerciálny navigačný systém a Inerciálny referenčný systém

Inerciálne navigačné systémy (INS) a ich modernejšia verzia Inerciálne referenčné systémy (IRS) využívajú gyroskopy a akcelerometre na meranie zrýchlení a rotácií lietadla voči trom osiam. Staršie INS systémy boli založené na stabilizovaných platformách, zatiaľ čo moderné IRS systémy sú pevne pripevnené ku konštrukcii lietadla ("strapdown" systém), čím sa zvyšuje ich spoľahlivosť. Inerciálne systémy sú schopné poskytovať presné informácie o polohe, rýchlosti a smere letu bez potreby vonkajších navigačných signálov. [22]

3.2.2. Flight Management System

Flight Management System (FMS) predstavuje integrovaný systém, ktorý údaje zo systémov IRS, GPS, VOR/DME a ďalších navigačných zdrojov s cieľom automatizovať navigáciu, výpočty trasy, optimalizovať spotrebu paliva a poskytnúť výstupy pre celkové riadenie letu. FMS umožňuje efektívne plánovanie a vykonávanie letu, pričom zabezpečuje vysokú mieru presnosti a prevádzkovej flexibility. [22]

3.3. Prehľadové systémy

Monitorovanie polohy lietadiel v reálnom čase je základným predpokladom bezpečného a efektívneho riadenia vzdušného priestoru. S rozvojom technológií dochádza k postupnému rozširovaniu možností monitorovania letovej prevádzky aj mimo pokrytia tradičnými radarovými systémami.

3.3.1. ADS-B

Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) je systém, v ktorom lietadlá samostatne vysielajú svoju polohu získanú pomocou GPS. Informácie o identifikácii, polohe, výške a rýchlosti sú vysielané automaticky. ADS-B prispieva k zvyšovaniu bezpečnosti, umožňuje efektívnejšie riadenie vzdušného priestoru a znižuje náklady na infraštruktúru. Vysielanie ADS-B môže obsahovať mnohé údaje od polohy letu, rýchlosťou nad zemou až po rôzne nastavenia systémov. [23]

3.3.2. Multilaterácia

Multilaterácia je metóda určovania polohy lietadiel na základe merania časového rozdielu príletu signálov odpovedačov na viaceré pozemné stanice. Táto technológia umožňuje zabezpečiť prehľad aj v oblastiach, kde nie je dostupné pokrytie sekundárnym radarom. Výhodou multilaterácie je jej flexibilita, nízke náklady na infraštruktúru a možnosť integrácie so systémami ADS-B. Multilaterácia a ADS-B predstavujú komplex technológií, ktoré umožňujú zabezpečiť komplexný prehľad o pohybe lietadiel v rôznych typoch vzdušného priestoru. Sieť multilaterácie sú schopné prijímať aj signály ADS-B, čím sa stávajú efektívnym riešením nielen pre monitorovanie letovej prevádzky, ale aj ako záložné systémy v prostredí budúceho letectva založeného na ADS-B. [23], [24]

4. Návrh na dovybavenie lietadlovej techniky Žilinskej univerzity v Žiline

Súčasný vývoj v oblasti letectva ukazuje, že integrácia moderných komunikačných, navigačných a prehľadových systémov je kľúčová nielen pre zvýšenie bezpečnosti letovej prevádzky, ale aj pre efektívnosť výcviku budúcich pilotov a odborníkov v oblasti letectva. S cieľom zvýšiť úroveň praktického výcviku a pripravenosti študentov Žilinskej univerzity na moderné letecké prostredie, je vhodné uvažovať o dovybavení existujúcej lietadlovej techniky vybranými technológiami, ktoré zodpovedajú aktuálnym trendom a požiadavkám v oblasti všeobecného letectva. Toto dovybavenie by mohlo študentom Žilinskej univerzity pomôcť nadobudnúť ďalšie znalosti pre svoju kariéru dopravných pilotov. Táto kapitola má zabezpečiť čitateľovi hlavne pohľad na špecifickú implementáciu moderných prístrojov určených na navigáciu a komunikáciu.

V súčasnosti prebieha vo všeobecnom letectve technologická revolúcia, ktorej hlavným znakom je prechod od klasických analógových prístrojov k digitálnym prístrojom – glass cockpitom. Tento trend je čoraz výraznejší aj v oblasti výcviku a dotýka sa nielen nových typov lietadiel, ale aj starších, ktoré je možné dovybaviť modernou avionikou. Niektoré lietadlá vo vlastníctve Žilinskej univerzity sú vybavené glass cockpitom, avšak radi by sme sa zamerali na špecifické dovybavenie lietadiel Piper PA28 a Piper PA34, ktoré sú aktuálne využívané na výcvik letu pomocou prístrojov. Vo svojom návrhu chceme priblížiť fungovanie integrovaného systému od spoločnosti Garmin G1000, ktorý spája mnohé navigačné a komunikačné systémy spomínané v práci. Systémom Garmin G1000 je zatiaľ vybavené iba jedno lietadlo Žilinskej univerzity, a to Diamond DA42.

Najväčšou výhodou systému G1000 v porovnaní s konkurenčnými produktmi je to, že umožňuje „lietať, navigovať a komunikovať“ z jedného 10-palcového displeja. Napríklad pri iných systémoch vieme definovať nevýhodu tak, že piloti musia pozerieť na viaceré miesta a údaje musia zadávať z viacerých prístrojov, či už navigačné, komunikačné alebo iné údaje. Garmin G1000 má možnosť dovybavenia alfanumerickou klávesnicou, podobnou ako CDU, ktorá sa využíva v komerčnej leteckej doprave pri systéme FMS. Táto klávesnica môže pomôcť simulovať podmienky nahrávania údajov do FMS [25].

Z pohľadu ľudského faktora je G1000 výnimočný v tom, že integruje všetky relevantné informácie do jedného displeja a má všetky príslušné ovládače hneď vedľa displeja. Pilot môže systém G1000 ovládať a monitorovať pomocou PFD. Napríklad pilot môže upraviť letový plán, sledovať svoju polohu na mape, monitorovať blízke lietadlá, nastaviť všetky rádiové a navigačné zariadenia, zobrazíť informácie o najbližších letiskách a monitorovať letové aj navigačné prístroje, všetko z jedného displeja [25].

Systém G1000 má v sebe integrované aj ďalšie dôležité moderné systémy ako Garmin Data Link alebo ADS-B. Tieto systémy sú v rôznom rozsahu bežne používané v komerčnej leteckej doprave, a preto sme ich spomenuli aj v tejto kapitole, lebo záverečná práca v predchádzajúcich častiach priamo vysvetľuje princíp fungovania týchto systémov.

Garmin Data Link je voliteľný systém, ktorý je možné integrovať do G1000. Po inštalácii poskytuje údaje o počasí prostredníctvom predplatenej služby XM Satellite Radio. Garmin

Data Link poskytuje možnosť zobrazíť aktuálne textové METAR-y a predpovede TAF pre ľubovoľné letisko, ktoré je podporované. Počasie vieme zobrazovať aj graficky, napríklad radarové a satelitné snímky, ktoré je možné zobrazíť vzhľadom na polohu lietadla. [25]

Pre zvýšenie bezpečnosti letu je systém vybavený funkciou ADS-B, ktorá zabezpečuje zobrazovanie okolitých lietadiel a aj vozidiel na pohyblivej mape. Technológia TargetTrend, ktorú má spoločnosť Garmin patentovanú, pomáha odhadnúť trajektóriu a rýchlosť približovania iných cieľov. Doplnkovo je možné integrovať aj systémy TCAS I/II pre aktívne sledovanie leteckej prevádzky. [26] ADS-B v lietadle pomáha identifikovať pozíciu lietadla, rýchlosť, výšku, predbežnú trasu a iné dôležité informácie pre riadiacich letovej prevádzky ako aj pre posádku lietadla.

Implementácia systému Garmin G1000 by predstavovala modernizáciu výcvikového prostredia, zvýšenie úrovne bezpečnosti a efektivity. Tento návrh reflektuje globálne trendy digitalizácie a automatizácie. Je však potrebné zohľadniť aj praktické výzvy spojené s integráciou systému, najmä ekonomickú náročnosť, technickú kompatibilitu existujúcej techniky a prípadné legislatívne obmedzenia. Preto je vhodné v budúcnosti spracovať aj hlbšiu technickú a ekonomickú analýzu pre reálnu implementáciu návrhu.

5. Záver

Práca sa venovala problematike využitia nových technológií v oblasti všeobecného letectva, s cieľom spracovať prehľadný a prakticky orientovaný študijný materiál, ktorý by slúžil ako doplnok k výučbe predmetu Letecká navigácia 2 na Žilinskej univerzite v Žiline. Spracovaný text poskytuje komplexný pohľad na aktuálne trendy v oblasti dátových komunikačných systémov, navigačných technológií a prehľadových systémov, pričom zdôrazňuje ich rastúce uplatnenie aj mimo tradičného komerčného letectva.

Práca bola rozdelená do troch hlavných častí: prvá časť ponúkla prehľad historického vývoja a legislatívneho rámca, druhá spracovala detailný opis moderných systémov ako Datalink, ACARS, CPDLC, SATCOM, INS, IRS, FMS, ADS-B a multilaterácia, a tretia časť bola zameraná na návrh možného dovybavenia lietadiel Žilinskej univerzity modernými technológiami na podporu výcviku podľa IFR štandardov.

Z pohľadu cieľa možno konštatovať, že práca naplnila svoj zámer a vytvorila základ, ktorý je vhodný na doplnenie existujúcich študijných materiálov. Súčasne sa ukázalo, že problematika modernizácie výcvikovej techniky si vyžaduje ďalšiu podrobnú analýzu, predovšetkým v oblastiach legislatívnych požiadaviek, technickej realizovateľnosti a ekonomickej náročnosti implementácie vybranej technológií. Tieto otázky presahujú rámec tejto práce a predstavujú vhodnú tému na samostatné projekty alebo hlbšie štúdie. Výsledné spracovanie tak predstavuje príspevok hlavne z didaktického hľadiska.

Referencie

- [1] JANÍČEK, TOMÁŠ Radiokomunikace : řízení lety : tréninkový manuál pro kandidáty GLD, PPL, CPL, v rozsahu znalostí nutných pro získání průkazu OFC a VF. . 1. vyd. [s.l.]: Cheb : Svět křídel, 2012 145 s. ISBN 978-80-87567-05-0.
- [2] ZÁVODSKÝ, KAREL A KOLEKTÍV Historie řízení letového provozu. . 1. vyd. [s.l.]: YOUR ARTILLERY 157 s. ISBN 978-80-905939-0-0.
- [3] RADIO NAVIGATION TIMELINE. In: Royal Institute of Navigation [online]. [cit. 2025-02-17]. Dostupné na: https://rin.org.uk/mpage/radio_navigation_timeline
- [4] BOWLING, Joren. History of Radionavigation [online]. [cit. 2025-02-17]. Dostupné na: http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/211_fall_2020/Joren_Bowling/joren_bowling/history-of-radionavigation.html
- [5] HERNÁNDEZ-PAJARES, M., JUAN, M., SANZ, J., SALAZAR, D. a RAMOS, P. Brief History of Radionavigation[online]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, IonSAT. [cit. 2025-03-17]. Dostupné na: http://chapman.upc.es/lectures/legad/docs/LeGAD-02-Brief_history_of_Radionavigation.pdf
- [6] WILLIAMS, Ralph R. Navigation: From Dead Reckoning to Navstar GPS [online]. Air & Space Forces Magazine, December 1, 1984 [cit. 2025-02-17]. Dostupné na: <https://www.airandspaceforces.com/article/1284navigation/>
- [7] NOVÁK, Andrej., NOVÁK SEDLÁČKOVÁ, Alena. Medzinárodnoprávna úprava civilného letectva. 1. vyd. V Žiline: Žilinská univerzita, 2010. 125 s. : Vysokoškolské učebnice. ISBN 978-80-554-0300-7.
- [8] NOVÁK SEDLÁČKOVÁ, Alena ., TOPOLČÁNY, Roman., KANDERA, Branislav., Letecký zákon a postupy ATC. 1. vyd. Bratislava: DOLIS, 2015. 302 s. ISBN 978-80-8181-018-3.
- [9] Air law : ATPL(A) and ATPL(H). 7th ed. Clevedon, UK: Bristol Groundschool International Limited, 2019. rôzne stránkované kapitoly. ISBN 978-1-912679-00-3.
- [10] Pravidlá v oblasti civilného letectva a Agentúra Európskej únie pre bezpečnosť letectva. In: EUR-Lex [online]. [cit. 2025-02-20]. Dostupné na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/?uri=LEGISSUM%3A4359400>
- [11] Civilné letectvo – Dopravný úrad. In: NSAT – Národný systém aktívnej tvorby [online]. [cit. 2025-02-20]. Dostupné na: <https://letectvo.nsat.sk>
- [12] Letecká informačná príručka Slovenskej republiky (eAIP SR). In: Letové prevádzkové služby Slovenskej republiky, štátny podnik [online]. 17. apríla 2025 [cit. 2025-02-21]. Dostupné na: https://aim.lps.sk/eAIP/eAIP_SR/AIP_SR_EFF_17APR2025_amdt/html/LZ-frameset-sk-SK.html
- [13] Datalink. In: EUROCONTROL [online]. [cit. 2025-02-25]. Dostupné na: <https://www.eurocontrol.int/function/datalink>
- [14] Federal Aviation Administration. Advisory Circular AC 90-117: Data Link Communications [online]. Washington, D.C.: FAA, 3. októbra 2017 [cit. 2025-02-25]. Dostupné na: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_90-117.pdf
- [15] NOVÁK, Andrej a KOVÁČIKOVÁ, Kristína. Advancements in VDL and CPDLC: Revolutionizing European Aviation Communication [online]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2023 [cit. 2025-03-05]. Dostupné na: <https://drepo.uniza.sk/server/api/core/bitstreams/9893d471-5872-44ac-bedc-c0167bdaca0d/content>
- [16] SMITH, Matthew, MOSER, Daniel, STROHMEIER, Martin, LENDERS, Vincent a MARTINOVIC, Ivan. Undermining Privacy in the Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS) [online]. In: Proceedings on Privacy Enhancing Technologies, 2018, č. 3, s. 105–122. ISSN 2299-0984. [cit. 2025-03-05]. Dostupné na: <https://doi.org/10.1515/popets-2018-0023>
- [17] SKYbrary. Controller Pilot Data Link Communications (CPDLC) [online]. SKYbrary Aviation Safety, [cit. 2025-03-18]. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/controller-pilot-data-link-communications-cpdlc>
- [18] ŽVINYS, Julius a RUDINSKAS, Darius. Investigation of the application of CPDLC to aerodrome air traffic control procedures [online]. Aviation, 2023, roč. 27, č. 2, s. 95–103. ISSN 1648-7788. [cit. 2025-03-18]. Dostupné na: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/Aviation/article/view/19113/11774>
- [19] HONEYWELL INTERNATIONAL INC. Discover the Benefits of Controller Pilot Data Link Communications (CPDLC) [online]. Phoenix: Honeywell Aerospace, 2021. [cit. 2025-03-22]. Dostupné na: https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/navigation-and-radios/brochures/N61-3068-000-000_CPDLC-bro.pdf
- [20] EUROCONTROL. SATCOM [online]. SKYbrary Aviation Safety, [cit. 2025-04-04]. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/satcom>
- [21] EUROCONTROL. Satellite communications datalink [online]. EUROCONTROL, [cit. 2025-04-04]. Dostupné na: <https://www.eurocontrol.int/system/satellite-communications-datalink>
- [22] Instrumentation : ATPL(A). 7th ed. Clevedon, UK: Bristol Groundschool International Limited, 2019. rôzne stránkované kapitoly : EASA ATPL (A) Theory Training. ISBN 978-1-912679-08-9.
- [23] MULTILATERATION.INFO. Multilateration [online]. [cit. 2025-01-24]. Dostupné na: <https://www.multilateration.info/surveillance/multilateration.html>
- [24] AIR NAVIGATION SERVICES OF THE CZECH REPUBLIC. MULTILATERATION & ADS-B. . 48 s. ISBN nebolo priradené ku knihe.

[25] TRESCOTT, Max. Max Trescott's G1000 glass cockpit handbook. 4th ed. Mountain View, CA: Glass Cockpit Publishing, 2009. iv, 305 s. ISBN 978-0-9777030-7-4.

[26] GARMIN INTERNATIONAL INC. G1000 NXi Integrated Flight Deck [online]. Garmin, [cit. 2025-04-14]. Dostupné na: <https://www.garmin.com/en-US/p/588901/pn/NXi-G1000-00>



ANALÝZA VYUŽÍVANIA UAVS AKO DOČASNÝCH ZARIADENÍ

Isaac Zared Iturbe Ibanez
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Patrik Veľký
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Drones are tools that have been used over time with different applications, which is why a division was made between the applications of a drone based on the frequency of their use. In this thesis, the specific and limited-use applications that a UAV can carry out were written about. Which means that the drone was considered as a temporary device. This was done with the objective of observing the advantages of its use compared to different alternatives in the implementation in the same application and making recommendations for its correct implementation. For the analysis, four different applications were considered, including: infrastructure monitoring, security and rescue, terrain mapping, and photography and videography, within each application, unmanned aerial vehicles (UAVs) were compared to their conventional counterparts (listed on the pages 34-41), thus making it possible to identify the advantages that unmanned aerial vehicles have over the other alternatives. It was found that drones have the following main advantages: access to difficult or high-risk areas, speed in executing the application, and high precision when collecting information.

Keywords

Drone, Temporal Device, Application, comparison, Advantage.

1. Úvod

Bezpilotné lietadlá (UAV), známe aj ako drony, zaznamenali výrazné rozšírenie svojho využívania vo viacerých sektoroch. Táto bakalárska práca sa zameriava na analýzu UAV v prípade ich využitia ako dočasných zariadení, t. j. keď je ich nasadenie obmedzené na špecifické, krátkodobé situácie, ako sú núdzové udalosti, monitorovanie životného prostredia, hromadné podujatia a podobne. Na rozdiel od trvalých alebo nepretržitých aplikácií tieto využitia reagujú na konkrétne potreby, čo ponúka špecifickú dynamiku z hľadiska efektívnosti, nákladovosti a prispôsobivosti. Cieľom tejto analýzy je identifikovať výhody a prevádzkové nedostatky UAV v uvedených typoch aplikácií a porovnať ich s inými technologickými alebo ľudsky riadenými riešeniami používanými na rovnaké účely. Na základe tohto porovnania budú navrhnuté odporúčania na optimalizáciu ich implementácie a preskúma sa možnosť zavedenia UAV v kontextoch, kde ich použitie dosiaľ nebolo zdokumentované. Metodika zahŕňa prehľad súčasného stavu využívania dronov, ich klasifikáciu, výhody a obmedzenia, ako aj porovnávaciu štúdiu reálnych aplikácií dočasných UAV a ich technologických alternatív. Na záver budú predstavené stratégie na rozšírenie ich využitia a zvýšenie efektívnosti v špecifických situáciách, ako aj návrhy rôznych aplikácií pre implementáciu UAV.

2. Súčasný stav riešenej problematiky

V tejto časti vysvetlíme, aký úžitok nám prinieslo používanie bezpilotných lietadiel (UAV), ako aj to, ako rozšírili naše možnosti v rôznych oblastiach vďaka ich využívaniu ako dočasných zariadení. Nakoniec sa zameriame na nevýhody a výzvy spojené s bezpilotnými lietadlami, ktoré obmedzujú ich využitie[1], [2], [3], [4].

2.1. Všeobecné výhody používania UAV

- Efektívnosť a ziskovosť.
- Bezpečnosť a bezpečnostná ochrana.
- Prístupnosť.
- Všestrannosť.
- Zber údajov.
- Výhody pre životné prostredie.
- Zvýšená produktivita.
- Presnosť[1], [2], [3], [4].

2.2. Obmedzenia UAV

Obavy o ochranu osobných údajov.

- Bezpečnostné ochrane riziká.
- Regulačné výzvy.
- Obmedzená kapacita užitočného nákladu.
- Výdrž batérie a doba letu.
- Zraniteľnosť voči kybernetickým útokom.
- Znečistenie hlukom.
- Obmedzený dosah[4].

3. Kategorizácia typov UAV a typov prevádzky

V tejto časti sa zameriame na spôsob, akým sú bezpilotné lietadlá kategorizované v rámci legislatívy členských štátov Európskej únie.

3.1. Kategorizácia UAV v rámci prevádzky podľa európskej únie

Táto kategorizácia je základom pre určenie požiadaviek na technické parametre UAV, spôsob ich prevádzky, ako aj na kvalifikáciu a povinnosti operátora[5], [6], [7].

UAV sa klasifikujú do troch hlavných kategórií: otvorená, špecifická a certifikovaná[5], [6], [7].

3.1.1. Otvorená kategória (nízke riziko)

Táto kategória zahŕňa prevádzku UAV, pri ktorej je riziko pre osoby a majetok na zemi považované za nízke. Prevádzka v tejto kategórii podlieha menej prísnyim požiadavkám[5].

3.1.2. Špecifická kategória (stredné riziko)

Do špecifickej kategórie patria všetky UAV operácie, ktoré prekračujú prevádzkové limity otvorenej kategórie, no zároveň nepredstavujú tak vysoké riziko, aby patrili do certifikovanej kategórie[6].

3.1.3. Certifikované kategórie

Certifikovaná kategória sa zaoberá prevádzkami, ktoré majú spomedzi všetkých kategórií najvyššiu mieru rizika. Tieto operácie budú zahŕňať aj budúce lety UAV s cestujúcimi na palube. Preto bude prístup používaný na zaistenie bezpečnosti ľudí počas týchto prevádzok alebo letov veľmi podobný prístupu používanému v pilotovanom letectve[7].

4. Využitie UAV ako dočasných zariadení v konkrétnych aplikáciách

Používanie dronov ako prostriedku podpory alebo pomoci pre určité zariadenia, ktoré sa budú používať dočasne, teda v špecifických situáciách, na špecifických miestach a/alebo na obmedzený čas, ako je uvedené v nasledujúcich príkladoch.

4.1. Letecká fotografia a filmovanie

V prípade dronov ako dočasných zariadení na fotografovanie a natáčanie videa sa to vzťahuje na tie, ktoré zachytávajú scénu, ktorá trvá len krátky čas, napríklad skok z budovy v akčnom filme[8].

4.2. Mapovanie a topografia

Pri použití bezpilotných lietadiel ako krátkodobého zariadenia na vývoj v kartografii, topografii a geológii by sa používali vo vymedzenej oblasti, napríklad pri mapovaní hory v lyžiarskom stredisku na posúdenie rizika novej lavíny v prípade nahromadenia alebo nadmerného množstva snehu[9].

4.3. Monitorovanie infraštruktúry

Použitím bezpilotných lietadiel ako dočasných zariadení pri monitorovaní infraštruktúry môžeme povedať, že ide napríklad o tie, ktoré by vykonávali kontrolu telekomunikačnej antény v prípade poruchy[10].

4.4. Záchrana a pomoc pri katastrofách

Používanie dronov ako dočasných zariadení pri záchrane a podpore v prípade katastrofy sa vzťahuje na ich nasadenie v situáciách, ktoré sa vyskytujú príležitostne a v obmedzenom priestore, napríklad v susedstve počas prírodnej katastrofy[11].

4.5. Dohľad a bezpečnostná ochrana

Bezpilotné lietadlá ako dočasné zariadenia v rámci dohľadu a bezpečnostných činností sa vzťahujú na tie, ktoré sú nasadené počas núdzových situácií alebo verejných udalostí, napríklad pri prevzatí moci vládnyim úradníkom alebo pri prenasledovaní podozrivého[12].

4.6. Kontrola znečistenia životného prostredia

Bezpilotné lietadlá používané pri kontrolách znečistenia životného prostredia ako dočasné zariadenia boli by pravidelne monitorovať podmienky v definovanej oblasti, napríklad v chránenej prírodnej oblasti[13].

4.7. Verejné podujatia a zábava

Bezpilotné lietadlá sa môžu používať na verejných podujatiach ako dočasné zariadenia v časovo obmedzených situáciách, napríklad pri svetelných show na koncertoch[14].

5. Metodika a metódy skúmania

Na začiatku práce som sa zamerlal na zhromažďovanie dostupných informácií o aktuálnom stave využívania bezpilotných lietadiel. Cieľom tohto kroku bolo získať komplexný prehľad o výhodách a nevýhodách UAV vo všeobecnosti, ako aj o ich praktickom uplatnení v rôznych oblastiach. V ďalšej fáze som realizoval výskum rôznych typov aplikácií, v ktorých sa UAV využívajú ako dočasné technologické riešenia. Z celkového množstva identifikovaných oblastí som následne vybral niekoľko kľúčových príkladov, konkrétne: monitorovanie infraštruktúry, mapovanie terénu, leteckú fotografiu a filmovanie, ako aj vyhľadávanie a záchranu osôb. Tieto aplikácie som následne podrobne analyzoval a porovnal s tradičnými alternatívami, ktoré sa v týchto oblastiach bežne používajú. Porovnanie bolo zamerané na identifikáciu slabých stránok a obmedzení jednotlivých prístupov. Na základe týchto poznatkov som navrhol spôsob, ako by bolo možné jednu z identifikovaných slabín UAV optimalizovať a tým zlepšiť ich efektívnosť v danej oblasti. Záverečná časť metodiky bola venovaná úvahe o potenciálnych oblastiach, kde by mohli byť UAV v budúcnosti implementované, no doposiaľ v nich nezohrávajú významnú úlohu.

6. Analýza

V rámci tejto časti práce sa zameriam na podrobnú analýzu vybraných aplikácií bezpilotných lietadiel UAV, ktoré boli

popísané v predchádzajúcej kapitole. Konkrétne pôjde o tieto oblasti: monitorovanie infraštruktúry, mapovanie terénu, letecká fotografia a filmovanie, a vyhľadávanie a záchrana osôb.

6.1. Monitorovanie infraštruktúry

Monitorovanie infraštruktúry predstavuje kľúčovú činnosť zameranú na zabezpečenie bezpečnosti, spoľahlivosti a dlhodobej prevádzky stavebných objektov a technických zariadení[15].

Manuálne inšpekcie

Ide o tradičný spôsob, pri ktorom pracovník fyzicky vykonáva kontrolu na mieste[16].

Inšpekcie s podporou UAV

Bezpilotné lietadlá poskytujú modernú alternatívu k manuálnym kontrolám. Sú vybavené integrovanými kamerami a senzormi, vďaka čomu nie je potrebné používať externé zariadenia[17].

Porovnanie dvoch kontrolných metód:

Tabuľka 1: porovnanie medzi manuálnym a UAV monitorovaním infraštruktúry[15], [16], [17], [18], [19] [20].

Kritérium:	Manuálne monitorovanie na mieste:	Monitorovanie prostredníctvom UAV:
Pristupnosť:	Obmedzená, najmä vo výškach alebo ťažko dostupných a rizikových oblastiach.	Vysoká: UAV sa ľahko dostanú aj do komplexných či rizikových zón.
Bezpečnosť:	Zvýšené riziko nehôd pre zamestnancov, najmä v nebezpečnom prostredí.	Nižšie riziko, pretože sa zabráni priamej expozícii personálu.
Čas kontroly:	Vyžaduje si viac času na logistiku, prípravu a často aj prerušenie prevádzky zariadenia.	Rýchlejšie: UAV dokážu za krátky čas pokryť rozsiahle územie bez nutnosti zastavenia prevádzky.
Okamžitý zásah:	Umožňuje priamu reakciu na identifikovaný problém (oprava, zásah).	UAV zabezpečujú len monitorovanie, zásah je potrebné vykonať následne.
Hmatové hodnotenie:	Umožňuje fyzický kontakt so štruktúrou a priame hodnotenie materiálov či povrchov.	Neumožňuje priamu interakciu s objektom, niektoré údaje nie je možné zozbierať bez fyzického kontaktu.
Cena:	Vysoké náklady kvôli potrebe ľudskej práce, špeciálneho vybavenia a možným prevádzkovým stratám.	Vyššie počiatkové náklady, avšak dlhodobou úspornejšie vzhľadom na nižšie personálne náklady.
Presnosť:	Vysoká presnosť závislá od odbornosti a skúseností inšpektora.	Vysoká a konzistentná presnosť vďaka pokročilým senzorom a vysokému rozlíšeniu kamier.
Pokrytie:	Limitované fyzickým dosahom inšpektora a dostupným vybavením.	Rozsiahle: UAV dokážu bez potreby ďalšej infraštruktúry monitorovať veľké a ťažko dostupné oblasti.

6.2. Mapovanie terénu

Mapovanie terénu predstavuje proces zberu údajov o geografických, fyzikálnych a morfológických vlastnostiach určitej oblasti počas konkrétneho časového obdobia[21].

Satelitné mapovanie

Kľúčovou výhodou je schopnosť diaľkového prieskumu Zeme, ktorý využíva senzory detegujúce odrazenú alebo vyžarovanú energiu zo zemského povrchu[22], [23].

Lietadlá s posádkou

Pilotované lietadlá operujú v nižších výškach ako satelity a dokážu zachytávať detailnejšie snímky. Využívajú LiDAR, GPS, spektrálne a hyperspektrálne senzory a sú schopné vykonávať leteckú fotogrametriu[24], [25].

Manuálne (pešie) mapovanie

Tradičné geodetické mapovanie vykonávané v teréne zahŕňa fyzické merania pomocou nástrojov ako teodolit, totálna stanica či nivelačný prístroj[26].

UAV (bezpilotné lietadlá)

Drony predstavujú moderný a flexibilný spôsob zberu dát. S využitím RGB kamier, GPS a v niektorých prípadoch aj LiDAR technológie dokážu UAV mapovať územie z nižších výšok, čím ponúkajú vysoké rozlíšenie a relatívne rýchly zber údajov[24], [25], [27].

Porovnanie metód mapovania:

Tabuľka 2 prvá časť: porovnanie metód mapovania[17], [20], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Technika.	Drony.	Satelity.	Lietadlá s posádkou.	Mapovanie pešo.
Priestorové rozlíšenie:	Vysoké: až na úrovni centimetrov/pixel.	Variabilné: nízke až stredné cca 10 m až 0,3 m/pixel.	Vysoké: od cm/pixel po metre/pixel v závislosti od výbavy a výšky letu.	Veľmi vysoké: priame pozorovanie a meranie v teréne.
Územné pokrytie:	Stredné: vhodné pre malé až stredne veľké oblasti.	Veľmi veľké: pokrytie celých kontinentov alebo krajín.	Veľké: vhodné pre mestá, povodia, regióny.	Obmedzené: len menšie, lokálne oblasti.
Prevádzkové náklady:	Nízke až stredné: závisia od vybavenia a údržby.	Nízke: pri použití voľne dostupných údajov. Vysoké: pri komerčných snímkach.	Vysoké: náklady na palivo, údržbu, posádku a logistiku.	Nízke: vyžaduje jednoduché vybavenie a terénny personál.
Typ zbieraných údajov:	RGB fotografie, multispektrálne snímky, termálne údaje, LiDAR.	Multispektrálne a termálne dáta, svetelný radar (LiDAR).	Fotogrametria, LiDAR, multispektrálne snímky.	Súradnice, náčrty, poznámky, kvalitatívne pozorovania.

Technika.	Drony.	Satelity.	Lietadlá s posádkou.	Mapovanie pešo.
Georeferencovanie:	Veľmi presné vďaka GPS integrovanému priamo v zariadení.	Variabilné: závisí od typu a výbavy satelitu.	Vysoká presnosť vďaka GPS a palubnej navigácii.	Presné: pri použití totálnej stanice alebo iných geodetických prístrojov.

Tabuľka 2 druhá časť: porovnávanie metód mapovania[17], [20], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Technika.	Drony.	Satelity.	Lietadlá s posádkou.	Mapovanie pešo.
Doba spracovania údajov:	Krátka: automatizované procesy fotogrametrie.	Variabilná: často vyžaduje komplexné spracovanie veľkého množstva údajov.	Stredne dlhá až dlhá: profesionálne spracovanie dát nevyhnutné.	Pomalá: ručný zber údajov, analýza a digitalizácia.
Pozorovanie ľudských detailov:	Obmedzené: závisí od výšky letu a rozlíšenia kamery.	Veľmi obmedzené: satelity zachytávajú len veľké a trvalé objekty.	Dobré: možné pozorovanie menších prvkov a činností človeka.	Výborné: priama interakcia s prostredím a detailné pozorovanie.
Dostupnosť v odľahlých oblastiach:	Veľmi dobrá: UAV sa dostanú aj do ťažko dostupných miest.	Vynikajúca: schopnosť pokryť akékoľvek miesto na Zemi.	Veľmi dobrá: možnosť preletu nad neprístupným terénom.	Obmedzená: závisí od fyzickej dostupnosti a pohyblivosti terénneho pracovníka.

6.3. Fotografovanie a filmovanie

V tejto časti sa budeme zaoberať leteckým fotografovaním a filmovaním, ktoré zahŕňa akékoľvek vizuálne záznamy nasnímané z výšky. Tieto záznamy sa získavajú pomocou rôznych nosičov, ako sú: UAV, lietadlá alebo helikoptéry, balóny alebo šarkany[27].

Tabuľka 3 prvá časť : porovnávanie metódami leteckého fotografovania a filmovaní[27], [29], [30].

Charakteristika:	Lietadlá s posádkou:	UAV:	Šarkany a Balóny:
Letová výška:	Vysoká až stredná (1000–10 000 m).	Nízka až stredná (20–500 m).	Nízka (do 150–300 m).
Rozsah pokrytia:	Veľmi široký: ideálne pre veľké územia.	Obmedzený: vhodný pre lokálne oblasti.	Obmedzený: silne závislý od vetra.

Charakteristika:	Lietadlá s posádkou:	UAV:	Šarkany a Balóny:
Kvalita / Rozlíšenie:	Veľmi vysoká: profesionálne metrické kamery.	Vysoká: závisí od typu kamery a senzora.	Stredná až dobrá: závisí od fotoaparátu.
Prevádzkové náklady:	Vysoké: palivo, posádka, povolenia.	Stredné: nabíjanie, údržba, operátor.	Nízke: minimálne náklady na prevádzku.
Manévrovateľnosť / Ovládanie:	Vysoká ale obmedzený v mestách.	Vysoká flexibilita, presné riadenie.	Veľmi obmedzená, závislá na vetre.

Tabuľka 3 druhá časť : porovnávanie metódami leteckého fotografovania a filmovaní[27], [29], [30].

Charakteristika:	Lietadlá s posádkou:	UAV:	Šarkany a Balóny:
Citlivosť na počasie:	Pracuje aj v mierne zhoršených podmienkach.	Citlivé na vietor a dážď.	Vysoká citlivosť s obmedzenou použiteľnosťou.
Doba letu / Výdrž:	Niekoľko hodín v závislosti od typu.	20–45 minút (štandard).	Závislá od vetra (bez motorového pohonu).
Právna dostupnosť:	Vyžaduje špeciálne povolenia a plánovanie.	Regulatívne obmedzené, vyžaduje licenciu.	Menej prísne regulované, ale s lokálnymi obmedzeniami.

6.4. Pátranie a záchrana ľudí

Pátranie a záchrana je súhrn činností vykonávaných za účelom lokalizácie, pomoci a evakuácie nezvestných alebo ohrozených osôb[31].

V súčasnosti sa na tieto účely používajú tri hlavné spôsoby:

Pozemné pátranie a záchrana (pešo): klasická forma, ktorá zahŕňa nasadenie záchranárov, psov, zdravotníkov a ďalších špecialistov priamo v teréne[32].

Pátranie a záchrana pomocou vozidiel s posádkou: využitie áut, terénnych vozidiel, vrtuľníkov alebo lietadiel[33].

Pátranie a záchrana pomocou UAV: moderný prístup využívajúci bezpilotné lietadlá vybavené senzormi, kamerami či termovíziou[34].

Porovnanie medzi rôznymi typmi pátracích a záchranných spôsobov:

Tabuľka 4 prvá časť: Porovnávanie medzi rôznymi typmi patriacich a záchranných spôsob[31], [32], [33], [34], [35].

Aspekt.	Pešo.	UAV.	Pilotovaných vozidiel.
Pokrytie:	Obmedzené, závislé od terénu a veľkosti tímu.	Široké, rýchle, ideálne pre vizuálne lokalizovanie.	Veľké, vhodné najmä pre dostupný terén.
Rýchlosť odozvy:	Stredná, podľa prístupnosti oblasti.	Vysoká, okamžité nasadenie.	Vysoká, limitovaná stavom ciest a terénu.
Presnosť polohy:	Vysoká, najmä pri použití kynologických tímov.	Veľmi vysoká, vďaka GPS, termokamerám.	Vysoká, ale menej detailná ako drony
Dostupnosť terénu:	Veľmi vysoká, prístup aj do nepriechodného terénu.	Vysoká, zvládne rizikové a ťažko dostupné miesta.	Nízka, problém v horskom a lesnom teréne.

Tabuľka 4 druhá časť: Porovnávanie medzi rôznymi typmi patriacich a záchranných spôsob[31], [32], [33], [34], [35].

Aspekt.	Pešo.	UAV.	Pilotovaných vozidiel.
Autonómia / trvanie:	Vysoká, limitovaná fyzickou výdržou ľudí.	Obmedzená, zvyčajne 20–45 minút letu.	Vysoká, podľa paliva a typu vozidla.
Prevádzkové náklady:	Stredné (výcvik, vybavenie, personál).	Nízke až stredné (údržba, batérie).	Vysoké (palivo, servis, personál).
Riziko pre operátorov:	Vysoké, priame vystavenie nebezpečenstvu.	Veľmi nízke, operátor je mimo ohrozenia.	Stredné, závisí od typu misie a prostredia.
Poveternostné podmienky:	Variabilné, možnosť nasadenia aj v nepriazni.	Citlivé na vietor, dážď, sneh.	Vyššia tolerancia než drony, no nie úplná.
Použité technológie:	Mapy, GPS, vysielачky, psy na stopovanie.	Termokamery, živý prenos, GPS, mapovanie.	Navigácia, senzory, komunikačné systémy.
Typ záchrany:	Lokalizácia, prvá pomoc, evakuácia.	Lokalizácia, podpora plánovania a koordinácie.	Transport, logistická podpora, evakuácia.

7. Výsledky

Tabuľka 5 prvá časť: Záver z analýz

Použitie:	Kontext	Trvanie používania	Odôvodnenie dočasného použitia	Výhody	Hlavné výzvy
Monitorovanie infraštruktúr:	Monitorovanie budov a zariadení.	Príležitostné.	Potrebné len počas monitorovania.	• Monitorovanie v reálnom čase. • Vysoká dostupnosť do neprístupných oblastí. • Väčšia bezpečnosť pre personál. • Rýchlejší proces monitorovania. • Zníženie nákladov z dlhodobého hľadiska. • Väčšia presnosť a objektivita. • Široký dosah.	• Vysoké počítačové náklady. • Nemožnosť fyzického kontaktu s objektmi. • Obmedzený zásah. • Závislosť od počasia.
Fotografia a filmovanie:	Letecké zábery a dokumentácia.	Príležitostné.	Krátkodobé využitie.	• Vysoká manévrovateľnosť • Priemerné náklady na prevádzku • Vysoká kvalita a rozlíšenie záberov	• Obmedzené územné pokrytie. • Závislosť od poveternostných podmienok. • Obmedzená výdrž batérie.

Tabuľka 5 druhá časť: Záver z analýz

Použitie:	Kontext	Trvanie používania	Odôvodnenie dočasného použitia	Výhody	Hlavné výzvy
Mapovanie terénu:	Akýkoľvek terén s potrebou mapovania.	Príležitostné.	Využitie len počas konkrétnych projektov.	• Vysoké rozlíšenie dát. • Rýchle spracovanie. • Presné georeferencovanie. • Prístup do odľahlých oblastí.	• Závislosť od počasia. • Menšie územné pokrytie oproti iným metódam. • Obmedzené ľudské pozorovanie detailov. • Vysoké počítačové náklady.
Pátranie a záchrana:	Katastrofy, núdzové situácie, nezvestné osoby.	Príležitostné.	Aktivácia len v prípade núdze.	• Široké územné pokrytie. • Vysoká rýchlosť odozvy. • Presnosť lokalizácie. • Prístup do nebezpečných oblastí. • Minimálne riziko pre operátorov. • Možnosti vybavenia (termokamery, GPS).	• Krátka výdrž batérie. • Stredné prevádzkové náklady.

8. Návrhy a odporúčania pre zlepšenie prevádzky a rozšírenie možností využívania UAV

Na základe analýzy hlavných problémov, ktorým UAV čelia v porovnaní s tradičnými metódami pri monitorovaní infraštruktúry, pátraní a záchrane, mapovaní terénu, fotografovanie a filmovanie, boli identifikované dva kľúčové nedostatky: obmedzená výdrž batérie a limitovaný prevádzkový dosah.

8.1. Odporúčania na zlepšenie efektivity UAV

Zlepšenie výdrže batérie:

Jedným z navrhovaných riešení je zavedenie bezdrôtových nabíjajúcich staníc alebo výmenných batériových bodov pozdĺž plánovanej trasy UAV. Tieto systémy by umožnili UAV automaticky sa nabiť počas krátkeho medzipristátia, čím by sa zabezpečilo plynulé a neprerušované plnenie úloh a minimalizovalo riziko výpadku počas kritických operácií[36].

Rozšírenie prevádzkového dosahu:

Ďalším odporúčaním je použitie vysokovýkonných antén a signálnych zosilňovačov, ktoré by rozšírili dosah medzi UAV a riadiacou stanicou. Tento prístup umožňuje efektívnejšie pokrytie väčších území, znižuje riziko straty spojenia alebo dátového prenosu a zvyšuje flexibilitu pri operáciách v členitom alebo vzdialenom teréne[37].

8.2. Možné oblasti nasadenia UAV ako dočasných zariadení

Kontrola teplovzdušného balóna:

Jednou z nových oblastí, kde by sa UAV mohli efektívne uplatniť, je inšpekcia teplovzdušných balónov. Od polovice roka 2024, keď FAA (Federálny letecký úrad) začala povoľovať využitie podobných technológií na kontrolu lietadiel, sa otvára priestor aj pre ich nasadenie v tejto sfére. UAV by boli ideálnym riešením na vykonávanie detailných kontrol balónov, najmä na miestach, ktoré sú pre ľudských inšpektorov ťažko prístupné[38].

Tréning športovcov

Ďalšou perspektívnou oblasťou je využitie UAV v profesionálnom tréningu športovcov. Drony môžu slúžiť ako podporný nástroj na sledovanie športového výkonu z vtáčej perspektívy v reálnom čase. Tréneri by tak mohli pozorovať techniku športovcov z rôznych uhlov a s okamžitou spätnou väzbou. UAV môžu navyše využívať vizuálne (svetelné) alebo zvukové podnety, ktoré pomáhajú viesť športovcov počas tréningu.

Monitorovanie vesmírnych infraštruktúr

Poslednou oblasťou, v ktorej by podľa mňa drony mohli mať pozitívny vplyv, je monitorovanie a kontrola vesmírnej infraštruktúry. Hoci sa drony používajú na monitorovanie interiéru rôznych typov infraštruktúr, ako je napríklad Medzinárodná vesmírna stanica, stále neexistuje žiadna dokumentácia o použití bezpilotných lietadiel na kontrolu stavu exteriéru týchto zariadení. Zavedenie takýchto riešení by mohlo znížiť potrebu výstupov do vesmíru a tým aj súvisiace riziká.

Záver

Počas tohto výskumu sa skúmalo využitie UAV ako dočasných zariadení v rôznych oblastiach, ako je monitorovanie infraštruktúry, pátranie a záchrana, mapovanie terénu či letecké fotografovanie a filmovanie. Tieto aplikácie ponúkajú významné výhody, predovšetkým v prístupe do zložitých alebo vysoko rizikových oblastí, v rýchlosti nasadenia a v schopnosti vysoko presného zberu údajov.

Zároveň sa však identifikovalo niekoľko kľúčových problémov, najmä závislosť od poveternostných podmienok a obmedzená životnosť batérie UAV. Napriek návrhom na ich zlepšenie, ako je implementácia bezdrôtového nabíjania počas letu či zosilnenie signálu prostredníctvom špeciálnych antén, zostáva dĺžka letu stále významným obmedzením aktuálnych UAV technológií.

Je dôležité zdôrazniť, že aj keď uvedené odporúčania môžu výrazne optimalizovať výkon UAV v konkrétnych aplikáciách, neustály technologický pokrok je kľúčový pre ich ďalší rozvoj. UAV dnes nielen dopĺňajú tradičné metódy, ale v mnohých prípadoch ich aj výrazne zlepšujú. Ich všestrannosť zároveň ukazuje, ako ich možno úspešne integrovať aj do odvetví, ktoré spolu na prvý pohľad nesúvisia.

Hoci UAV stále čelia určitým technickým obmedzeniam, ich potenciál transformovať a zefektívniť činnosti v rôznych oblastiach, od inžinierstva, cez bezpečnosť až po umenie, je nepopierateľný. Budúcnosť týchto technológií, podporovaná neustálym inovačným vývojom, sľubuje zásadný vplyv na spôsob, akým vykonávame priemyselné aj vedecké aktivity.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra 2014 - 2020 pre projekt: Inteligentné operačné a spracovateľské systémy pre UAV, s ITMS kódom projektu 313011V422, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Referencie

- [1] "15 Usos de drones que quizás no conocías", Aviation Group. Cit: 27. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.aviationgroup.es/actualidad/usos-drones-no-conocias/>
- [2] R. Skiba, *Operaciones con Drones: Pilotaje Recreativo y Comercial*. After Midnight Publishing, 2024.
- [3] G. Chamayou, *Teoría del dron: Nuevos paradigmas de los conflictos del siglo XXI*. NED Ediciones, 2016.
- [4] C. Moldtrans, "Drones y logística: cuáles son sus ventajas y desventajas básicas", Grupo Moldtrans. Cit: 27. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.moldtrans.com/los-drones-y-la-logistica/>
- [5] "Open Category — Low Risk — Civil Drones | EASA". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/open-category-low-risk-civil-drones>

- [6] "Specific Category — Civil Drones | EASA". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/specific-category-civil-drones>
- [7] "Certified Category — Civil Drones | EASA". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/certified-category-civil-drones>
- [8] R. Castro, "VYUŽÍVANIA UAVS AKO DOČASNÝCH ZARIADENÍ vo fotografii a filmovaní", 2025.
- [9] J. Ocampo, "Využívania uavs ako dočasných zariadenie v mapovaní", 2025.
- [10] E. Bahena, "Využívania uavs ako dočasných zariadenie v monitorovaní infraštruktúry", 2025.
- [11] E. Paz, "Využívania uavs ako dočasných zariadenie v SAR", 2025.
- [12] K. Garcia, "Využívania uavs ako dočasných zariadenie vo BO", 2025.
- [13] H. Marlene, "Využívania uavs ako dočasných zariadenie v KŽP", 2025.
- [14] J. Fernández, "Využívania uavs ako dočasných zariadenie v VPZ", 2025.
- [15] "CS-23 Amendment 2 | EASA". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/cs-23-amendment-2>
- [16] "Drone Vs. Traditional Inspection Methods Which Is Right For Your Building - Rommel". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://rommel.co.nz/drone-vs-traditional-inspection-methods/>
- [17] VV.AA, *Aplicaciones de drones en ingeniería civil: Topografía inspección de obra y estructuras*. Marcombo, 2022.
- [18] "EL USO DEL DRON EN UNA INSPECCIÓN". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://es.linkedin.com/pulse/el-uso-del-dron-en-una-inspeccion-C3%B3n-ec4-oficial-1xhhc>
- [19] F. SA, "DRONES DE INTERIORES PARA INSPECCIÓN DE ALCANTARILLADOS". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.flyability.com/es-ar/inspeccion-de-alcantarillados>
- [20] R. G. Herrera *et al.*, "Drones. Aplicaciones En Ingeniería Civil Y Geociencias", *Interciencia*, roč. 44, č. 6, s. 326–331, 2019.
- [21] M. of E. and C. C. Strategy, "About Terrain Mapping - Province of British Columbia". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/land/terrain/about-terrain-mapping>
- [22] admin, "What Are Satellite Maps?" Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://satpalda.com/what-are-satellite-maps/>, <https://satpalda.com/what-are-satellite-maps/>
- [23] "OBS-Teledeteccion.pdf". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf?fbclid=IwY2xjawJzaf5leHRuA2FlbQIxMAABHmKC5gvrQyXbnVhmOb19L2fcgDE3X3CawTr8mRfhew0DAILaA_JmTjbp0X5_aem_y76avzd2KInoDhmabxNRcA
- [24] "UAV Surveying and mapping: Why Planes Still Dominate". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://synergymapping.com/uav-surveying-and-mapping-vs-manned-aircraft/>
- [25] "Aerial Mapping", Bowman. Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <http://bowman.com/services/aerial-mapping/>
- [26] "Herramientas de topografía para medición, levantamiento del terreno y monitorización". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: https://www.topconpositioning.com/latam/solutions/infrastructure/surveying?product=&_page=1
- [27] D. J. I. Enterprise, "Topografía con drones: ¿cuál es la diferencia entre la fotografía aérea y la fotogrametría?" Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://enterprise-insights.dji.com/es/blog/aerofotografia-vs-fotogrametria>
- [28] R. H. Á. Camargo a A. F. Giraldo, "COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL MONITOREO DE TALUDES O LADERAS INESTABLES EN EL MUNICIPIO DE ZETAQUIRA – BOYACÁ MEDIANTE TÉCNICAS TRADICIONALES DE TOPOGRAFÍA Y TÉCNICA MODERNA DE DRONES".
- [29] A. A. Vidal, M. S. Quintero, a R. Eppich, "The View from Above. Overview and Comparison of Low Cost Aerial Photographic Techniques", Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: https://www.academia.edu/4431604/The_View_from_Above_Overview_and_Comparison_of_Low_Cost_Aerial_Photographic_Techniques
- [30] "11665.pdf".
- [31] "Search and Rescue (SAR) | SKYbrary Aviation Safety". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: https://skybrary.aero/articles/search-and-rescue-sar?fbclid=IwY2xjawJzujBleHRuA2FlbQIxMAABHk0D8YvamOPfnf-cylSgHWvxiwoj7dO5a4JLQC_WYhvyckXXPID0RivXBF_M_aem_zHbC97m2dlaQWLv0v2mnkQ
- [32] "BR.pdf". Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: https://hg289.com/docs/UIPC/BR.pdf?fbclid=IwY2xjawJzujRleHRuA2FlbQIxMAABHh6qJptmVLWuAraEE9OCOXIJkr9RuTYGj57FGCw0h_OS7BhqQAISvhlPblB_aem_A3uh62_fDDz7uQWv8ltohw
- [33] "¿Qué es el rescate y qué tipos hay?", Prohesol. Cit: 28. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://prohesol.com/blogs/noticias/que-es-el-rescate-y-que-tipos-hay>
- [34] R. A. Khalil, N. Saeed, a M. Almutiry, "UAVs-assisted passive source localization using robust TDOA ranging for search

and rescue”, *ICT Express*, roč. 9, č. 4, s. 677–682, aug. 2023, doi: 10.1016/j.ict.2022.04.011.

[35] “Inicio a la Búsqueda y Rescate: guía básica para voluntarios de emergencias | K9 Rescate Protección Civil 2025”. Cit: 28. abril 2025. [Online]. Available at: <https://k9rescate.com/busqueda-y-rescate/>

[36] “DJI Battery Station - DJI”, DJI Official. Cit: 28. abril 2025. [Online]. Available at: <https://www.dji.com/sk/tb50-battery-station>

[37] “Antenna Amplifier for RC Remote Control | Search Results”. Cit: 28. abril 2025. [Online]. Available at: <https://store.dji.com/sk/product-search>

[38] “Industry first: FAA accepts Delta’s plan to use drones for maintenance inspections | Delta News Hub”. Cit: 22. abril 2025. [Online]. Available at: <https://news.delta.com/industry-first-faa-accepts-deltas-plan-use-drones-maintenance-inspections>



VYUŽITIE NOVÝCH MATERIÁLOV V KROŠTRUKCII KRÍDEL LIETADIEL

Soňa Jánošíková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jakub Jackuliak
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

In this Bachelor thesis, the topic of utilizing new materials in aircraft wings construction was addressed. The technical and physical properties of modern materials were examined in order to assess their potential to improve flight performance and reduce structural weight. The work includes an overview of the evolution from traditional materials such as wood, through aluminum and titanium alloys, to current composite materials. Parameters such as strength, weight, corrosion and fatigue resistance, as well as aerodynamic impact and sustainability, were evaluated. The study highlighted the significant advantages of modern materials, which enable weight reduction, increased strength, and improved aerodynamic performance of wings. A theoretical application of a new material was conducted, and its impact on flight performance was assessed through a conceptual design of the wings of the Discus-2 and ASW-19 glider models. To achieve the objective, computational methods based on MacCready's theory, basic aerodynamic formulas, and available data from scientific sources were used. Parameters such as glide ratio, optimal speed, wing weight, and flight time on a 300 km course were evaluated. The conclusion of the thesis confirms that the application of innovative materials in wing structures represents a significant contribution to the further development of aviation, while also emphasizing the need for continued research and optimization of technologies.

Keywords

Materials, Wings, Composites, Shape memory alloys, Construction

1. Úvod

Vývoj nových materiálov v oblasti letectva za posledné desaťročia predstavuje významný technologický pokrok, ktorý zásadným spôsobom ovplyvňuje návrh a konštrukciu krídel lietadiel. S narastajúcimi požiadavkami na znižovanie hmotnosti lietadiel, optimalizáciu spotreby paliva, zvýšenie bezpečnosti a zlepšenie výkonových parametrov sa otvárajú nové možnosti využitia materiálov, ktoré ďaleko presahujú limity tradičných riešení. Zavádzanie pokročilých kompozitných materiálov, inteligentných štruktúr a pamäťových zliatin umožňuje vývoj ľahších, pevnejších a adaptívnejších konštrukčných prvkov, pričom osobitnú pozornosť si zasluhujú práve krídla — kľúčové nosné prvky lietadla, ktoré čelia najvyšším mechanickým aj aerodynamickým zaťaženiam.

Krídla výrazne ovplyvňujú vztlak, stabilitu a manévrovateľnosť lietadla a preto sa ich modernizácia pomocou nových materiálov javí ako mimoriadne perspektívna cesta k optimalizácii letových vlastností a zvýšeniu celkovej efektivity. Táto práca sa preto zameriava na analýzu potenciálu využitia pamäťovej zliatiny Nitinol v konštrukcii krídel vetroňov, a prostredníctvom teoretického návrhu hodnotí jej vplyv na zlepšenie aerodynamiky, zníženie odporu a zvýšenie výkonnosti v konkrétnych modeloch vetroňov Discus-2 a ASW-19.

2. Súčasný stav riešenej problematiky

Vývoj konštrukčných materiálov používaných v letectve prešiel za posledné storočie dynamickým a neustále sa zrýchľujúcim procesom, ktorý bol priamo ovplyvňovaný technologickým pokrokom, narastajúcimi výkonovými požiadavkami a snahou o zvyšovanie bezpečnosti a efektivity letu. Od prvých pokusov bratov Wrightovcov na začiatku 20. storočia až po dnešné

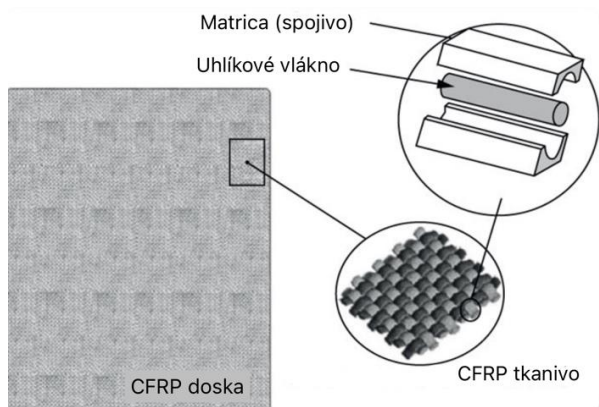
vysoko sofistikované kompozitné lietadlá došlo k zásadným zmenám nielen v použitých materiáloch, ale aj v samotnej filozofii návrhu konštrukcií.

V raných fázach letectva boli dominantnými materiálmi drevo a bavlnené plátno, ktoré vďaka svojej ľahkosti a relatívnej pevnosti umožňovali konštrukciu prvých lietadiel s dostatočne nízkou hmotnosťou. Avšak tieto prírodné materiály trpeli mnohými nevýhodami — najmä nízkou odolnosťou proti vlhkosti, obmedzenou životnosťou a nízkou spoľahlivosťou pri dlhodobej prevádzke. S rastúcimi požiadavkami na vyššie rýchlosti, väčšie doletové vzdialenosti a zlepšenú odolnosť proti nepriaznivým poveternostným vplyvom sa začali v 20. rokoch minulého storočia presadzovať kovy, predovšetkým hliník a jeho zliatiny.

Hliník sa rýchlo stal hlavným stavebným materiálom v letectve vďaka svojmu vynikajúcemu pomeru pevnosti k hmotnosti, dobrej spracovateľnosti a odolnosti proti korózii. V priebehu druhej svetovej vojny zohral kľúčovú úlohu pri výrobe vojenských lietadiel a stal sa základom pre rýchly rozvoj povojnového civilného letectva. Postupne boli do konštrukcie lietadiel zavádzané aj titánové zliatiny, ktoré sa vyznačovali ešte vyššou odolnosťou pri vyšších teplotách a lepšou mechanickou stabilitou. Titán, hoci bol drahší a náročnejší na spracovanie, našiel svoje uplatnenie najmä v konštrukcii vysokorýchlostných a nadzvukových lietadiel, ako napríklad Lockheed SR-71 Blackbird.

V posledných desaťročiach nastal nástup kompozitných materiálov, ktoré predstavujú výrazný pokrok v oblasti konštrukcie lietadiel. Kompozity, najmä uhlíkové v kombinácii s polymérnymi matricami (CFRP), ponúkajú výnimočný pomer pevnosti k hmotnosti, vysokú odolnosť voči únave a korózii a možnosti tvarovania, ktoré sú v prípade kovových materiálov obmedzené. Vďaka týmto vlastnostiam sa kompozity stali

neoddeliteľnou súčasťou modernej leteckej výroby a dnes tvoria významnú časť primárnych a sekundárnych štruktúr civilných aj vojenských lietadiel.



Obrázok 1: Štruktúra CFRP

Okrem kompozitov sa v niektorých prípadoch stále využíva oceľ, najmä v oblastiach, kde je prioritou extrémna pevnosť alebo odolnosť proti opakovanému cyklickému zaťaženiu. Oceľové zliatiny sú však vďaka svojej vyššej hmotnosti vhodné skôr pre špecifické aplikácie, ako sú podvozky, časti motorov alebo vysoko namáhané spoje.

V súčasnosti sa vývoj nových materiálov zameriava predovšetkým na kombináciu viacerých výhod – nízkej hmotnosti, vysokej pevnosti, dlhej životnosti, nízkej náročnosti na údržbu a schopnosti znížiť environmentálnu záťaž počas celého životného cyklu lietadla. Výskum sa tiež orientuje na inteligentné materiály, ktoré umožňujú aktívne prispôbovanie štruktúry lietadla počas letu, čím sa výrazne zvyšuje jeho aerodynamická efektívnosť a prevádzková flexibilita.

Preto súčasný stav riešenej problematiky jasne ukazuje, že tradičné materiály ako hliník či titán sú síce stále významné, avšak nové kompozitné a inteligentné materiály ponúkajú širšie možnosti pre budúcu optimalizáciu výkonu lietadiel, predĺženie ich životnosti a zníženie nákladov na prevádzku a údržbu. Tento trend bude s veľkou pravdepodobnosťou pokračovať aj v budúcnosti s cieľom zvýšiť efektívnosť leteckej dopravy.

3. Teória zaťaženia a požiadavky na nové materiály konštrukcie lietadiel

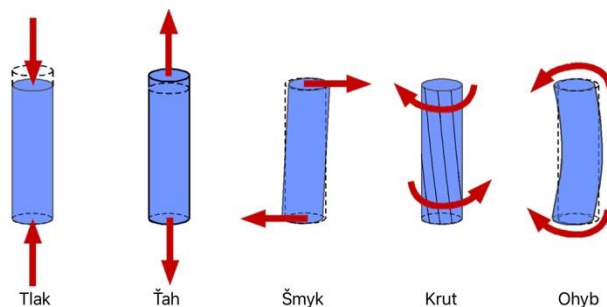
Krídla lietadiel patria medzi najviac zaťažované časti celej konštrukcie a počas letu sú vystavené pôsobeniu širokého spektra mechanických a aerodynamických zaťažení, ktoré vznikajú v rôznych fázach letu. Základné statické zaťaženia zahŕňajú predovšetkým vlastnú hmotnosť konštrukcie krídla a hmotnosť paliva umiestneného v krídlových. Okrem toho sa na krídla prenáša aj významná časť hmotnosti pasažierov a nákladu cez trupové nosníky. Tieto statické zaťaženia pôsobia konštantne počas celého letu a vyžadujú, aby mala konštrukcia krídla dostatočnú pevnosť a tuhosť na ich bezpečné prenášanie bez deformácií alebo straty stability.

Dynamické aerodynamické zaťaženia, ktoré vznikajú v dôsledku prúdenia vzduchu okolo krídla, predstavujú ďalšiu významnú skupinu pôsobiacich síl. Počas vzletu, pristátia, manévrovania

alebo pri lete v turbulentnom prostredí dochádza k neustálym zmenám intenzity a smeru týchto síl. Zmeny v distribúcii vzlaku a odporu po rozpätí krídla spôsobujú ohybové momenty, torzné zaťaženia a lokálne šmykové napätia, ktoré musia byť zachytávané bez narušenia integrálnej stability krídlovej štruktúry. Poryvy vetra a náhle vertikálne alebo horizontálne pohyby vzduchu vyvolávajú krátkodobé, ale intenzívne dynamické namáhanie, ktoré môžu výrazne prekročiť bežné prevádzkové zaťaženia.

Osobitnú kategóriu predstavujú extrémne aerodynamické javy, ako je flutter – aeroelastický fenomén, pri ktorom interakcia medzi aerodynamickými silami a prirodzenými vlastnosťami pružnosti a hmotnosti konštrukcie vedie k rýchlo rastúcim kmitavým pohybom. Ak flutter nie je potlačený alebo dostatočne oddialený správnou konštrukciou, môže spôsobiť fatálne zlyhanie krídla počas veľmi krátkej doby. Preto je návrh krídla podrobený prísny aerodynamickým analýzám už v počiatočných fázach vývoja.

Mechanické zaťaženia, ktorým krídla čelia, zahŕňajú celý rad účinkov vrátane ťahu, tlaku, šmyku, ohybu a torzie. Ťah a tlak sa objavujú v hlavných nosných prvkoch pri prenose vzlakových síl. Šmyk pôsobí v oblasti rebra a štruktúry krídlového poťahu, zatiaľ čo ohybové momenty vznikajú v dôsledku rozdielného rozloženia síl po rozpätí krídla. Torzia je vyvolaná najmä nesymetrickým zaťažením alebo pôsobením pohyblivých ovládacích plôch, ako sú krídelká a klapky.



Obrázok 2: Grafické namáhanie jednotlivých konštrukcií

Požiadavky kladené na materiály používané v krídlovej konštrukcii sú preto mimoriadne náročné. Materiály musia vykazovať vysoký pomer pevnosti k hmotnosti, aby bolo možné zabezpečiť dostatočnú mechanickú odolnosť pri minimalizácii hmotnosti konštrukcie – čo je rozhodujúce pre letovú výkonnosť aj spotrebu paliva. Zároveň sa vyžaduje vysoká odolnosť proti únavovému poškodeniu spôsobenému opakovaným dynamickým namáhaním počas tisícok letových cyklov. Dôležitá je aj vynikajúca odolnosť proti korózii, keďže krídla sú neustále vystavené vlhkosti, dažďu, námraze a ďalším nepriaznivým environmentálnym podmienkam.

Materiály musia tiež vykazovať rozmerovú stabilitu pri extrémnych teplotných zmenách – pri letoch vo veľkých výškach môže teplota poklesnúť na extrémne nízke hodnoty, zatiaľ čo pri rýchlom lete v nízkych výškach sa povrch krídla môže intenzívne zahrievať. Nízka tepelná rozťažnosť a dobré tepelno-mechanické vlastnosti sú preto nevyhnutnosťou pre zachovanie integrálnej stability celej krídlovej konštrukcie.

Okrem technických požiadaviek musia materiály spĺňať aj prísne regulačné normy civilného aj vojenského letectva, vrátane

certifikačných štandardov EASA (Európska agentúra pre bezpečnosť letectva) a FAA (Federálny letecký úrad USA). Certifikácia zahŕňa testovanie pevnosti, únavy, odolnosti proti požiaru a ďalších kritických parametrov, pričom každý nový materiál musí prejsť náročným schvaľovacím procesom pred svojím zavedením do sériovej výroby.

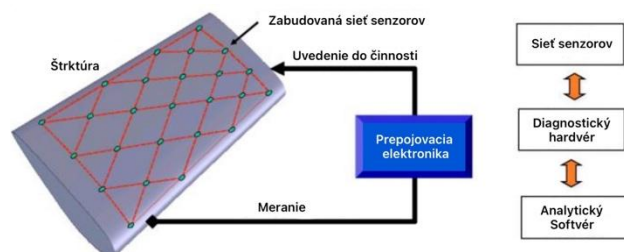
V neposlednom rade zohráva rolu aj ekonomický faktor – použité materiály musia byť nielen výkonné a bezpečné, ale aj cenovo dostupné pre hromadnú výrobu lietadiel. Výrobná technológia spracovania materiálov, možnosť recyklácie a nároky na údržbu počas životnosti lietadla sú ďalšie aspekty, ktoré ovplyvňujú ich výber. Preto je moderný vývoj v oblasti konštrukčných materiálov pre letectvo orientovaný na hľadanie riešení, ktoré optimálne kombinujú mechanické vlastnosti, životnosť, spracovateľnosť a udržateľnosť.

4. Požiadavky a vlastnosti nových materiálov

Vývoj nových materiálov pre letectvo je dnes formovaný súborom náročných a vzájomne previazaných požiadaviek. Moderné materiály musia zabezpečovať nielen tradičné vlastnosti, ako sú pevnosť, tuhosť a odolnosť voči únave, ale čoraz častejšie sa od nich očakáva aj schopnosť plniť viacero funkcií súčasne. Tento trend smerom k multifunkčnosti znamená, že materiály by nemali byť len pasívnymi nositeľmi zaťaženia, ale mali by aktívne prispievať k bezpečnosti, efektívnosti a udržateľnosti lietadla počas jeho celej životnosti.

Multifunkčné materiály predstavujú nový štandard vo vývoji konštrukčných riešení. Popri základnej nosnosti sa od nich vyžaduje schopnosť detekcie poškodení, aktívne riadenie tvaru konštrukčných prvkov alebo dokonca schopnosť uchovávanie elektrickej energie. Významnou oblasťou sú takzvané samoopravné materiály, ktoré v prípade vzniku mikrotrhlín alebo drobných defektov dokážu aktivovať mechanizmus autonómnej opravy, čím znižujú riziko šírenia poškodenia a predlžujú životnosť štruktúry. Tieto systémy môžu byť založené na kapsulovaných polyméroch alebo na vnútorných chemických reakciách, ktoré regenerujú poškodenú štruktúru bez potreby zásahu údržby.

Dôležitou funkciou moderných materiálov je aj schopnosť monitorovania štruktúrneho zdravia. Integrované senzory, ako napríklad piezoelektrické senzory alebo optické vlákna s Braggovou mriežkou, umožňujú v reálnom čase sledovať zaťaženie, deformácie a vibrácie v kľúčových častiach konštrukcie. Tento spôsob monitorovania zvyšuje bezpečnosť lietadla a umožňuje prediktívnu údržbu, čím sa znižujú prevádzkové náklady a predlžuje životnosť lietadiel.



Obrázok 3: Štruktúra a systém piezoelektrických senzorov

Ďalšou perspektívnou oblasťou sú materiály schopné uchovávať elektrickú energiu. Výskum v oblasti tzv. štruktúrnych batérií je zameraný na vývoj kompozitov, ktoré slúžia zároveň ako nosné prvky a ako zdroj energie pre palubné systémy. Tým by sa významne znížila celková hmotnosť lietadla, čím by sa zvýšila jeho energetická efektívnosť.

Mimoriadne dôležité miesto medzi inteligentnými materiálmi majú pamäťové zliatiny, predovšetkým Nitinol. Táto zliatina, schopná meniť svoj tvar v reakcii na teplotné zmeny alebo elektrický prúd, umožňuje aktívne riadenie deformácie konštrukčných prvkov bez potreby tradičných mechanických mechanizmov. V letectve to otvára nové možnosti pre adaptívnu aerodynamiku, dynamické riadenie profilu krídla alebo autonómne opravy štruktúrnych deformácií počas letu.

Okrem funkčných požiadaviek musia nové materiály spĺňať aj náročné ekonomické kritériá. Hoci pokročilé materiály ako uhlíkové kompozity a titánové zliatiny ponúkajú vynikajúce mechanické vlastnosti, ich výroba je finančne náročná. Efektívne zavádzanie nových materiálov do sériovej výroby preto vyžaduje technologické riešenia, ktoré znižujú výrobné náklady, urýchľujú proces výroby (napríklad využitím aditívnej výroby) a umožňujú jednoduchšiu recykláciu použitých materiálov po skončení životnosti lietadla.

S rastúcim dôrazom na environmentálnu zodpovednosť sa do popredia dostáva aj požiadavka na ekologickú udržateľnosť materiálov. Moderné konštrukčné materiály by mali nielen znižovať emisie počas prevádzky lietadla, ale aj minimalizovať ekologický dopad počas výroby, prevádzky a likvidácie. V tejto súvislosti sa skúmajú bio-kompozity, ktoré využívajú prírodné vlákna v kombinácii s recyklovateľnými alebo biologicky rozložiteľnými polymérmi. Bio-kompozity ponúkajú zaujímavý pomer pevnosti k hmotnosti, nižšiu energetickú náročnosť výroby a možnosť ekologickej likvidácie, čo ich robí vhodnými kandidátmi pre budúce aplikácie v civilnom letectve.

Zhrnutím možno povedať, že požiadavky a vlastnosti nových materiálov v letectve presahujú rámec tradičných mechanických parametrov. Dnešné materiály musia byť zároveň ľahké, pevné, multifunkčné, odolné, ekonomicky dostupné a ekologicky udržateľné. Splnenie týchto komplexných nárokov je kľúčom k ďalšiemu zvyšovaniu efektivity a udržateľnosti leteckej dopravy v budúcnosti.

5. Metodika práce a metódy skúmania

Metodologický postup zvolený v tejto práci vychádza zo systematickej kombinácie teoretickej analýzy, spracovania dostupných údajov z literatúry, odborných článkov, technických manuálov výrobcov lietadiel a aplikácie jednoduchých výpočtových modelov. V prvej fáze bol spracovaný dôkladný prehľad vývoja materiálov používaných v konštrukcii krídel lietadiel – od počiatočných použití dreva a bavlne, cez nástup kovových konštrukcií (hliníkové, titánové, ocelové zliatiny), až po moderné kompozitné systémy ako CFRP a GFRP. Analyzovaný bol nielen materiálový vývoj, ale aj vplyv týchto zmien na aerodynamickú efektívnosť, životnosť a údržbu konštrukcií.

Druhá fáza metodiky spočívala vo výbere reprezentatívnych modelov vetroňov – Discus-2 ako moderného vetroňa novej generácie s vysokou aerodynamickou efektívnosťou a ASW-19 ako

predstaviteľa staršej generácie, kde existuje taktiež priestor na zlepšenie výkonnosti prostredníctvom modernizácie materiálov. Potom bolo potrebné vykonať podrobnú analýzu oboch vybraných vetroňov, pričom sa zohľadnili ich konštrukčné riešenia, geometria krídla, materiálové zloženie a letové charakteristiky. Discus-2 predstavuje modernejšieho zástupcu s optimalizovanou kompozitnou konštrukciou, zatiaľ čo ASW-19 je starší model s jednoduchším kompozitovým riešením a odlišnými mechanickými vlastnosťami krídel. Táto voľba umožnila porovnať efekt aplikácie Nitinolu v dvoch rôznych generáciách vetroňov a vyhodnotiť jeho vplyv na výkonnosť.

V tretej fáze bola stanovená stratégia integrácie pamäťovej zliatiny do krídel. V prípade modelu Discus-2 sa navrhovalo umiestniť nitinolové pásy do oblasti odtokovej hrany krídla. Konštrukcia Discusu umožňuje, aby bol Nitinol začlenený do vrstvenej sendvičovej štruktúry: vonkajšia vrstva z CFRP (uhlíkový kompozit), stredná vrstva z pružnej peny alebo elastoméru a vnútorná vrstva tvorená nitinolovými pásmi. Tento návrh zabezpečuje možnosť aktívne meniť zakrivenie zadnej časti profilu počas letu, čo vedie k optimalizácii vztlaku a odporu podľa aktuálnych letových podmienok.

Pri modeli ASW-19 sa však ukázalo, že vzhľadom na tenkú a menej spevnenú odtokovú hranu by aplikácia nitinolu v tejto oblasti nebola konštrukčne vhodná. Preto sa pozornosť zamerala na nábežnú hranu krídla, kde je možné vytvoriť robustnejšiu viacvrstvovú štruktúru schopnú niesť integrované prvky pamäťovej zliatiny. Navrhované riešenie spočívalo vo vrstvení GFRP (kompozitu so sklenenými vláknami) a elastoméru v kombinácii s nitinolom, čo by umožnilo vytvorenie sklopnej nábežnej hrany. Táto sklopná štruktúra by sa pri vyššom aerodynamickom zaťažení v termických prúdoch mierne deformovala, čím by zvýšila vztlak bez potreby klasických mechanických klapiek.

Pre aktiváciu nitinolu boli uvažované dve metódy. Prvou bola aktivácia pomocou nízkeho elektrického napätia, napríklad batériou umiestnenou v trupe lietadla, čo je praktické riešenie z hľadiska spoľahlivosti a jednoduchosti. Druhou alternatívou bolo využitie solárnych článkov, ktoré by zabezpečili energetickú samostatnosť systému, čím by sa eliminovalo riziko zlyhania v dôsledku vybitia batérie – aspekt obzvlášť dôležitý pri bezmotorových vetroňoch.

6. Výsledky

Výsledky tejto práce preukázali, že aplikácia nových inteligentných materiálov, konkrétne pamäťových zliatin, do konštrukcie krídel vetroňov môže predstavovať významný prínos pre optimalizáciu letových výkonov. Prostredníctvom teoretického návrhu začlenenia nitinolu do krídel vetroňov Discus-2 a ASW-19 boli stanovené potenciálne zlepšenia kľúčových parametrov ako sú aerodynamická jemnosť (L/D), optimálna rýchlosť a čas letu na definovanej trati.

Analýza ukázala, že v prípade modernejšieho Discusu-2 by integrácia nitinolových pásov do oblasti odtokovej hrany umožnila jemné prispôsobovanie profilu krídla aktuálnym podmienkam letu. V dôsledku toho by došlo k zníženiu aerodynamického odporu pri vyšších rýchlostiach a zároveň k zachovaniu dostatočného vztlaku v kritických fázach letu. Výpočty založené na MacCreadyho teórii naznačujú, že by sa

dosiahlo zvýšenie aerodynamickej účinnosti, prejavujúce sa nárastom maximálnej kľzavosti a znížením času potrebného na absolvovanie 300-kilometrovej trate.

V prípade staršieho modelu ASW-19 sa vďaka návrhu implementácie nitinolu do nábežnej hrany krídla ukázal ešte výraznejší potenciál na zlepšenie výkonu. Vzhľadom na pôvodne menej optimalizovanú geometriu profilu by umožnenie adaptívnej deformácie nábežnej hrany viedlo k výraznému zvýšeniu vztlaku pri nižších rýchlostiach, čo by sa priamo premietlo do lepšej stúpavosti vetroňa. To by sa prejavilo nielen v skrátení času stúpania v termických prúdoch, ale aj v schopnosti efektívnejšie využívať slabšie stúpavé prúdy, čím by sa zlepšila celková výkonnosť na súťažných tratiach.

Tabuľka 3: Zmena letových parametrov pre Discus-2

Parameter	Discus-2 (pôvodné)	Discus-2 (po aplikácii nitinolu)
Kľzavosť	46	48
Optimálna rýchlosť	110 km/h	114,8 km/h
Čas na 300km	3h 37min	3h 29min

Tabuľka 4: Zmena parametrov pre ASW-19

Parameter	ASW-19 (pôvodné)	ASW-19 (po aplikácii nitinolu)
Kľzavosť	38,5	40
Optimálna rýchlosť	100 km/h	103.75 km/h
Čas na 300km	4h 5min	3h 55min

Tabuľkové porovnanie parametrov pred a po teoretickej aplikácii nitinolu potvrdilo, že zlepšenie výkonnosti je reálne dosiahnuteľné. V prípade Discusu-2 došlo k nárastu maximálneho pomeru L/D a k zníženiu priemerného času letu na 300 km trati o približne 8 minút, čo je v kontexte športového letectva významné zlepšenie. Pri ASW-19 bol zaznamenaný ešte vyšší prínos, so zlepšením kľzavosti aj stúpavosti, pričom čas potrebný na absolvovanie trate sa mohol skrátiť o cca 10 minút.

Celkovo výsledky ukázali, že správna aplikácia pamäťových zliatin v konštrukcii krídel môže priniesť hmatateľné aerodynamické výhody. Navyše, v porovnaní s tradičnými mechanickými riešeniami (ako sú mechanické klapky) ponúkajú inteligentné materiály možnosť znížiť hmotnosť, zvýšiť spoľahlivosť a minimalizovať potrebu údržby, čo je v bezmotorovom letectve zásadnou výhodou.

7. Záver

Cieľom práce bolo analyzovať možnosti využitia moderných materiálov v konštrukcii krídel lietadiel. V rámci spracovania boli predstavené vlastnosti rôznych nových materiálov a princíp ich funkcie. Tieto vlastnosti boli následne posúdené z hľadiska ich možného prínosu pre letecké konštrukcie, predovšetkým v

oblasti aerodynamickej efektivity, adaptability tvaru krídla a hmotnostnej optimalizácie.

Na účely praktického porovnania boli zvolené dva typy vetroňov – starší model ASW-19 a modernejší model Discus-2. V oboch prípadoch bol navrhnutý spôsob integrácie pamäťovej zliatiny nitinol do vybraných častí krídla. Pri modeli ASW-19 sa zvažovala aplikácia v oblasti nábežnej hrany, zatiaľ čo pri modeli Discus-2 v oblasti odtokovej hrany. Na základe predpokladaných geometrických úprav a hmotnostného prínosu bola vykonaná výpočtová analýza vplyvu týchto úprav na letové výkony, predovšetkým na kĺzavosť, maximálnu výkonnosť a čas potrebný na prelet definovanej trate.

Na základe výsledkov možno konštatovať, že cieľ práce bol naplnený. Boli predstavené vlastnosti nových materiálov, vyhodnotený ich potenciál pre aplikáciu v leteckej a analyzovaný konkrétny vplyv na letové výkony vetroňov. Práca poukazuje na možnosť ďalšieho výskumu v tejto oblasti, najmä v súvislosti s praktickou implementáciou týchto materiálov, ich spoľahlivosťou v prevádzke a technologickými nárokmi na výrobu.

Zavedenie pamäťových zliatin do leteckej konštrukcie by mohlo v budúcnosti prispieť k vývoju adaptívnych prvkov krídla, ktoré sa dokážu dynamicky prispôbovať letovým podmienkam. Takéto riešenia môžu významne prispieť k zníženiu spotreby paliva, zlepšeniu aerodynamickej efektivity a zvýšeniu celkovej výkonnosti lietadiel. Do budúcnosti je preto vhodné zamerať výskum nielen na vývoj nových typov inteligentných materiálov, ale aj na praktické overovanie existujúcich návrhov v rámci experimentálnych letových testov a numerických simulácií.

Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

1. Writer, Staff. *A brief history of aircraft materials*. [online]. Thomasnet. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/insights/a-brief-history-of-aircraft-materials/>
2. AIRBUS. *Aviation's material evolution*. [online]. Airbus, 2017. Dostupné z: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2017-02-aviations-material-evolution>
3. Aluminium Aircraft. *Aluminum sheet for aircraft wing*. [online]. Dostupné z: <https://www.aircraftaluminium.com/application/2a12202425247055-aluminum-sheet-for-aircraft-wing.html>
4. KYOCERA SGS Precision Tools Europe Ltd. *Applications of titanium and its alloys*. [online]. Dostupné z: [https://kyocera-sgstool.co.uk/titanium-resources/titanium-information-](https://kyocera-sgstool.co.uk/titanium-resources/titanium-information-everything-you-need-to-know/applications-of-titanium-and-its-alloys/)

[everything-you-need-to-know/applications-of-titanium-and-its-alloys/](https://www.kyocera-sgstool.co.uk/titanium-resources/titanium-information-everything-you-need-to-know/applications-of-titanium-and-its-alloys/)

5. Bocheng Wang, Pengju He, Yingnan Kang, Jiabin Jia, Xin Liu, Nan Li. *Ultrasonic Testing of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites*. [online]. ResearchGate. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/361590225_Ultrasonic_Testing_of_Carbon_Fiber-Reinforced_Polymer_Composites/figures?lo=1
6. CÍGER, A. *Možnosti využitia nových materiálov v konštrukcii lietadiel*. [online]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline. Dostupné z: <https://www.brokerske-centrum.uniza.sk/doc/Ciger-II.pdf>
7. Eagle Pubs. *Aerospace structures*. [online]. Eagle Pubs (Embry–Riddle Aeronautical University). Dostupné z: <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/aerospace-structures/>
8. AeroToolbox. *Wing structural design – Loads Acting on a Wing*. [online]. Dostupné z: <https://aerotoolbox.com/wing-structural-design/#loads-acting-on-a-wing>
9. Aerospheres. *Key factors to consider when choosing materials used in the aerospace industry*. [online]. Dostupné z: <https://www.aerospheres.com/news/Key-Factors-to-Consider-When-Choosing-Materials-Used-in-the-Aerospace-Industry/>
10. Gardiner, Ginger. *Aerocomposites: the move to multifunctionality*. [online]. CompositesWorld. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/aerocomposites-the-move-to-multifunctionality>
11. European Commission. *Self-healing Polymers for Concepts on Self-repaired Aeronautical composites*. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/article/id/191215-selfhealing-polymers-for-aircraft-composites>
12. Rui Wu, Paul A. Selvadurai, Chaojian Chen, Omid Moradian. *Revisiting Piezoelectric Sensor Calibration Methods Using Elastodynamic Body Waves*. *Journal of Nondestructive Evaluation*. [online]. 2021, 40, 38. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10921-021-00799-1>
13. Yu Shi, Stephen R. Hallett, Meiling Zhu. *Energy harvesting behaviour for aircraft composites structures using macro-fibre composite: Part I – Integration and experiment*. [online]. 2017, 117, s. 143–155. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822316321377>
14. Girolamo Costanza, Maria Elisa Tata. *Shape Memory Alloys for Aerospace, Recent Developments, and New Applications: A Short Review*. [online]. 2020, 13(8), 1856. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/8/1856>

15. Shahariar Mahmud, Mohammad Shahinuzzaman
Chowdhury, Md. Delwar Hossain Beg. *Sustainable
Biocomposites for Aircraft Components*. [online]. f-cdn.com.
Dostupné z: [https://cdn5.f-
cdn.com/files/download/149460618/SUSTAINABLE%20BIOCO
MPOSITES%20FOR%20AIRCRAFT%20COMPONENTS.pdf](https://cdn5.f-cdn.com/files/download/149460618/SUSTAINABLE%20BIOCOMPOSITES%20FOR%20AIRCRAFT%20COMPONENTS.pdf)



LETISKO PIEŠŤANY A ROZVOJ LETECKEJ DOPRAVY S OHĽADOM NA CHARAKTER REGIÓNU

Filip Kocúrik
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Alena Novák Sedláčková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article is primarily devoted to the topic of Piešťany Airport and the development of air transport in this region. Its aim is to propose new air connections from Piešťany Airport, which would lead to the development of air transport at this airport and to the regional development of its catchment area. It deals in detail with Piešťany airport and its catchment area, which is determined here. The article also highlights and describes in more detail the impact of air transport on the development of the region, specifying various levels of this impact. Some of the results of a questionnaire survey conducted by the author are presented and analysed. Based on these results, the article then provides a proposal for air connections that could be operated from Piešťany Airport in the future. The proposed connections could lead to the development of the region in which the airport is located and to an increase in the rate of use of air transport by its residents.

Keywords

Air transport, Piešťany Airport, Regional development, Catchment area, Tourism, Industry

1. Úvod

Nevyhnutnou súčasťou leteckej dopravy sú letiská, ktoré sú hlavnými prvkami leteckej infraštruktúry a dôležitými strategickými prvkami každej krajiny. Následný vhodný výber spojení, ktoré bude poskytovať dané letisko, tvorí základ fungujúcej a zmysluplnej leteckej dopravy pre región, v ktorom sa letisko nachádza. Tento článok sa zameriava na konkrétne slovenské letisko - letisko Piešťany a jeho potenciál v previazanosti na obyvateľstvo, cestovný ruch a priemysel v regióne.

Prvá časť článku je venovaná letisku Piešťany a jeho spádovej oblasti, ktorá je tu vytýčená a charakterizovaná, a prezentuje prínosy, ktoré by rozšírenie spojení z letiska Piešťany mohlo do daného regiónu priniesť. Článok obsahuje taktiež návrh rozvoja leteckej dopravy v tomto regióne. Je tu opísaný prieskum formou dotazníkov, ktorý bol vykonaný autorom, za účelom zistenia informácií priamo od obyvateľov, organizácií v cestovnom ruchu a priemyselných firiem, z tejto oblasti. Ďalej sú tu prezentované výsledky tohto prieskumu, z ktorých pramení následný návrh nových leteckých spojení z letiska Piešťany, zahŕňajúci návrhy destinácií, prevádzkujúcich leteckých spoločností a používaných typov lietadiel.

2. Letisko Piešťany a jeho spádová oblasť

Ako bolo spomenuté v úvode, článok je zameraný na letisko Piešťany a na jeho spádovú oblasť, teda geografickú oblasť, pre ktorú môže mať prevádzka daného letiska význam a z ktorej môžu prúdiť potenciálny cestujúci. Táto kapitola je preto venovaná podrobnému opisu letiska Piešťany z hľadiska histórie, technických aspektov a prevádzky, a tiež vytýčeniu a charakteristike jeho spádovej oblasti.

2.1. História letiska

Letisko v Piešťanoch má bohatú históriu. Tá siaha až do roku 1926, kedy tu bolo založené vojenské letisko a v nasledujúcich rokoch tu sídlil letecký pluk. Od roku 1933 sa tu však etablovala aj civilná letecká doprava, začínajúc prvou pokusnou linkou Piešťany – Vajnory. Po skončení vojny a následnej rekonštrukcii došlo k obnoveniu civilnej prevádzky a Piešťany boli medzipristátím na linke Praha – Budapešť. Významným bolo aj spojenie Piešťany – Bratislava – Praha. V 60. rokoch boli tiež veľmi obľúbené charterové lety do Popradu v rámci výletov do Vysokých Tatier. Zároveň významným cieľom cestujúcich prilietajúcich do Piešťan boli kúpele, ktoré ČSA propagovali v zahraničí. Rekordný bol rok 1969, kedy bolo prepravených až 44 tisíc cestujúcich. Po politických zmenách v roku 1989 a páde komunistického režimu sa letisko postupne transformovalo na civilné letisko s medzinárodným statusom. V roku 2001 bola zrušená vojenská základňa a letisko sa tak stalo čisto civilným. Avšak, s poklesom dopytu sa letisko dostalo do finančných problémov, ktoré sa ešte prehĺbili počas globálnej ekonomickej krízy v rokoch 2008 – 2009. Finančné straty sa zväčšovali, počet cestujúcich klesal, a nedarilo sa nájsť nového investora. To viedlo až k tomu, že sa vážne uvažovalo o likvidácii letiska Piešťany. To však vzbudilo odpor, vznikla iniciatíva za jeho záchranu a letisko zrušené nebolo. V roku 2019 sa podarilo dohodnúť nové charterové lety do Turecka, Egypta a Izraela a počet cestujúcich vzrástol, čo znamenalo po rokoch obnovenie osobnej leteckej dopravy [1].

2.2. Technické aspekty

Letisko Piešťany (LZPP) sa nachádza severne od mesta Piešťany, asi 3 km od jeho centra, v nadmorskej výške 166 m n. m. Má povolenie na prevádzku ako VFR, tak aj IFR, počas dňa i počas noci. Hlavným prvkom letiska je jedna vzletová a pristávacia dráha s orientáciou 01/19 z asfaltobetónu. Je dlhá 2000 m a široká 30 m, čím sa radí medzi neštandardne úzke dráhy.

Letisko poskytuje 7 parkovacích miest pre lietadlá. Z nich 5 sa nachádza na spevnenej odbavovacej ploche pred terminálom. Na 2 miestach môžu parkovať lietadlá až do typu B737-800, ďalšie 2 sú vhodné pre o niečo menšie typy, do B737-500 a pre jedno miesto je limitujúcim typom ATR42-500. Zvyšné 2 parkovacie miesta sú vytvorené na trávinatej ploche a prijímajú stroje do veľkosti L410. Čo sa týka rádionavigačných zariadení, letisko je vybavené ILS CAT I na dráhu 01, teda systémom pre presné priblíženie prvej kategórie (limitmi pre pristátie sú výška rozhodnutia nie menej ako 60 m, dráhová dohľadnosť minimálne 550 m a viditeľnosť minimálne 800 m). Ďalej disponuje nesmerovým rádiomajákom NDB, ktorý umožňuje aj menej presné NDB priblíženie na dráhu 01. Súčasťou ILS je aj zariadenie DME, teda zariadenie na meranie vzdialenosti. Letisko je taktiež osvedčené pre využitie GNSS navigácie, teda navigácie pomocou satelitných systémov, vrátane presného priblíženia RNP. Poskytujú sa tu základné handlingové služby ako vysokozdvížne vozíky, pásové nakladače a ťahače. Počas zimnej prevádzky je k dispozícii odmrázovacie zariadenie a vozidlá na čistenie vzletovej a pristávacej dráhy, rolovacích dráh a odbavovacej plochy. Taktiež je tu možné tankovanie paliva JET A1. Požiarna kategória je na úrovni 4 [2].

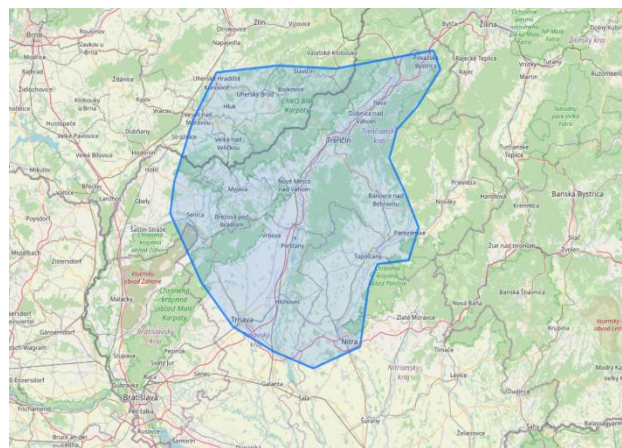
2.3. Súčasná prevádzka

Objem prevádzky na letisku Piešťany nie je taký veľký ako na iných medzinárodných letiskách, avšak aj toto pomerne malé množstvo letov je pre letisko mimoriadne dôležité v rámci jeho revitalizačného procesu. V rámci osobnej leteckej dopravy v roku 2024 poskytovalo spojenia do 3 destinácií, a to do tureckej Antalye, egyptskej Hurghady a izraelského Tel Avivu. Charterové lety do Antalye boli k dispozícii celkovo 5 krát týždenne a boli určené pre slovenských dovolenkárov. Prevádzkované boli tureckými dopravcami Tailwind Airlines (3 lety za týždeň) a Freebird Airlines (2 lety za týždeň), v spolupráci so slovenskými cestovnými kancelárkami. Charterové lety do Hurghady boli prevádzkované raz týždenne egyptským dopravcom FlyEgypt. V máji bola obnovená aj pravidelná linka do Tel Avivu. Tá bola v prevádzke už počas predošlej sezóny, avšak kvôli zhoršeniu bezpečnostnej situácie v Izraeli, spôsobenému vojenským konfliktom, boli lety v októbri 2023 predčasne zastavené. K ich obnoveniu došlo v máji 2024 s frekvenciou raz týždenne [3]. Tieto lety boli určené najmä pre klientov z Izraela prichádzajúcich do piešťanských kúpeľov. V roku 2023 letisko Piešťany vybavilo viac ako 27 000 cestujúcich, čo predstavuje historický rekord [4].

2.4. Spádová oblasť letiska Piešťany

Spádová oblasť letiska je vo všeobecnosti geografická oblasť okolo letiska, v ktorej sa očakáva, že letisko zaujme svojich potenciálnych zákazníkov. V podstate ide o zemepisné ohraničenie trhu daného letiska, ktoré sa bežne stanovuje ako vzdialenosť 100 kilometrov alebo približne 60 minút doby strávenej na ceste autom, autobusom, či vlakom. V praxi sa však veľkosti a tvary spádových oblastí odlišujú, keďže je nutné brať do úvahy špecifiká jednotlivých letísk [5]. Keďže v prípade Piešťan ide o menšie letisko regionálneho charakteru, ktoré je zatiaľ schopné zaujať cestujúcich skôr z časovo dostupnejších lokalít než z veľkých vzdialeností, pre potreby našej práce sme na vytýčenie spádovej oblasti použili kritérium 60 minút jazdy autom. Typickým fenoménom pre strednú Európu je relatívna

blízkosť jednotlivých letísk, v dôsledku čoho dochádza k prelínaniu sa ich spádových oblastí. V tomto prípade sa prelínajú spádové oblasti letiska Piešťany a letiska M. R. Štefánika v Bratislave, keďže tieto dve letiská ležia vo vzdialenosti len 80 km, a preto sú si navzájom konkurentami. Avšak napriek tejto blízkosti, Piešťany momentálne nemôžu priamo konkurovať Bratislave [6]. Preto sme spádovú oblasť smerom na juh a juhozápad skrátili a vytýčili tak, aby pokrývala územie, kde bude pre potenciálnych zákazníkov reálne výhodnejšie uprednostniť piešťanské letisko pred tým bratislavským. Nami stanovená spádová oblasť pokrýva časti Trenčianskeho, Trnavského a Nitrianskeho samosprávneho kraja. Tento región západného Slovenska je jedným z najhustejšie obývaných v rámci krajiny. Okrem územia Slovenska spádová oblasť zasahuje aj na územie Českej republiky, konkrétne Zlínskeho a Juhomoravského kraja. Letisko Piešťany môže byť atraktívnym pre zákazníkov aj z tejto oblasti, keďže je časovo dostupnejšie ako moravské letisko Brno-Tuřany. Orientačné znázornenie spádovej oblasti môžeme vidieť na obrázku č. 1:



Obrázok 1 Spádová oblasť letiska Piešťany
Zdroj: www.freemap.sk, vlastné spracovanie

Ďalším zaujímavým faktom, ktorý by sme okrem vyššie definovanej spádovej oblasti mohli brať do úvahy, je, že letisko Sliač (LZSL) bolo v roku 2021 uzavreté pre civilnú prevádzku a v súčasnosti a aj v najbližších rokoch bude fungovať len ako vojenské letisko. Podobná situácia platí aj pre letisko Žilina (LZZI), ktoré síce je prístupné pre civilnú leteckú prevádzku, ale najmä kvôli svojim technicko-prevádzkovým charakteristikám nie je využívané pre pravidelnú obchodnú prevádzku. Tieto skutočnosti znamenajú, že spádová oblasť letiska Piešťany by mohla byť tvorená aj časťami spádových oblastí týchto dvoch letísk. Spádová oblasť by potom bola o niečo rozšírená smerom na východ a na sever, čo by znamenalo ešte väčší počet potenciálnych zákazníkov.

Nami definovaná spádová oblasť letiska Piešťany predstavuje z pohľadu cestovného ruchu atraktívny región. Z hľadiska príchodu zahraničných turistov je najvýznamnejším z nich kúpeľníctvo. V tejto oblasti sa nachádzajú až štyri slovenské a jedny české významné kúpele: kúpele Piešťany, nachádzajúce sa len pár kilometrov od letiska Piešťany, kúpele Trenčianske Teplice, kúpele Smrdáky, kúpele Nimnica a v rámci Českej republiky tu nájdeme kúpele Luhačovice. Tieto kúpele ponúkajú rôzne liečebné a relaxačné pobyty a sú známe aj v zahraničí.

Okrem kúpeľov v oblasti nájdeme viaceré turisticky zaujímavé mestá. Najmä tri krajské mestá sú navštevované zahraničnými návštevníkmi. Hlavnou atrakciou Trenčína je Trenčiansky hrad, rozsiahly zrekonštruovaný hrad z 11. storočia týčiaci sa nad mestom. Trnava, prezývaná aj "Malý Rím" je známa svojim zachovalým historickým centrom s množstvom kostolov. V Nitre môžu zase turisti navštíviť napríklad dominantu mesta - Nitriansky hrad s bazilikou. Región Považie je známy bohatým výskytom hradov, ktoré ponúkajú spojenie histórie s prírodou. Nachádza sa tu množstvo zrúcanín ako Čachtický hrad, Beckov, Tematín, Branč a mnohé ďalšie, ale i zachovalé zámky a kaštiele ako napríklad Smolenický zámok či kaštieľ v Dolnej Krupej. Región ponúka tiež niekoľko prírodných krás. Nachádza sa tu jedna z najkrajších sprístupnených jaskýň na Slovensku – jaskyňa Driny. Turisti tiež môžu využiť množstvo trás v Malých Karpatoch, Považskom Inovci či Strážovských vrchoch.

Priemysel je pre spádovú oblasť letiska Piešťany mimoriadne dôležitým prvkom. Nachádza sa tu veľké množstvo ako domácich, tak aj zahraničných firiem, zameraných na rôzne priemyselné odvetvia. Priemysel sa tu výrazne podieľa na tvorbe zamestnanosti a v Trenčianskom kraji je podiel ľudí pracujúcich v priemysle najvyšší spomedzi všetkých krajov. Významným regiónom je práve Považie, na ktorom leží aj letisko, a ktoré je jednou z oblastí s najrozvinutejším priemyslom na Slovensku. Jeho veľkou prednosťou je prítomnosť diaľnice D1 a železničnej trate, ktoré prechádzajú celým regiónom a umožňujú jednoduché spojenie firiem s inými časťami Slovenska a zahraničím, čím výrazne uľahčujú ich logistiku. Táto výhoda sem láka zahraničných investorov a zahraničné nadnárodné spoločnosti tu aj v súčasnosti budujú svoje prevádzky.

Z pohľadu priemyselných odvetví v oblasti dominuje strojársky priemysel, ktorý tu má dlhoročnú tradíciu. Jeho centrom sú mestá Považská Bystrica, kde je napríklad významná výroba ložísk, Dubnica nad Váhom, kde sa vyrábajú ťažké stroje a technika, a Trenčín. Druhým najvýznamnejším je elektrotechnický priemysel, v oblasti sídli niekoľko firiem špecializovaných na výrobu elektronických komponentov, káblov a pod. V Púchove dominuje gumársky priemysel prostredníctvom závodu Continental na výrobu pneumatík. V rámci automobilového priemyslu, ktorý je na Slovensku rozšírený, sa tu nachádza výrobný závod Stellantis v Trnave (bývalý závod PSA) Jaguar Land Rover v Nitre a novootvorený závod Porsche, nachádzajúci sa v tesnej blízkosti letiska a ktorého rozširovanie je v pláne.

3. Vplyv leteckej dopravy na rozvoj regiónu

Letecká doprava ako súčasť dopravného systému štátu zohráva dôležitú úlohu aj na regionálnej úrovni a jej dostupnosť má výrazný vplyv na jednotlivé regióny. Zabezpečuje ich spojenie so zahraničím a prispieva k ich spoločenskému a ekonomickému rozvoju. Miera rozvoja leteckej dopravy je jedným z faktorov na meranie životnej úrovne, keďže má viaceré ekonomické a spoločenské prínosy pre daný región [7].

Letecká doprava významne prispieva k hospodárskemu rastu krajiny tým, že zabezpečuje prepravu tovaru pre priemysel, podporuje a stimuluje obchod, cestovný ruch a tvorbu pracovných miest. Na druhej strane, ekonomická aktivita podporuje a vytvára dopyt po leteckej doprave a ekonomické činnosti vytvárajú rôznorodé potreby, ktoré podporujú leteckú

dopravu a zlepšujú infraštruktúru a prostredie pre jej rozvoj [8]. Letecká doprava umožňuje integráciu regiónu do celoštátnej a globálnej ekonomiky a je dôležitým prvkom v rámci dlhodobého hospodárskeho rastu, keďže sa podieľa na tvorbe HDP – hrubého domáceho produktu. Medzi jej hlavné vplyvy na región patrí uľahčenie a podpora cestovného ruchu najmä na medzinárodnej úrovni, rozvoj priemyslu, prínos nových investícií, umožnenie exportu tovarov, tvorba pracovných miest a prísun kapitálu do regiónu. Vplyvy letiska je možné rozdeliť do 4 základných typov:

1. Priame vplyvy – spôsobené samotnou prevádzkou letiska ako takého. Sú spojené s aktivitami letiska a firiem tu pôsobiacich, ako prevádzka letiska, činnosť leteckých spoločností, riadenie letovej prevádzky, údržba lietadiel, manipulácia s nákladom a pod. Zahŕňajú najmä vplyv na zamestnanosť a tým na zdroje príjmov.
2. Nepriame vplyvy – spôsobené činnosťou dodávateľov v oblasti. Ide tiež hlavne o zamestnanosť a tvorbu príjmov vyplývajúce z činnosti dodávateľov podieľajúcich sa na fungovaní letiska, ako napr. dodávateľov cateringu, leteckého paliva a ďalších.
3. Indukované vplyvy – vyplývajúce z ekonomickej aktivity zamestnancov letiska alebo leteckej spoločnosti, ktorí robia útratu v rámci národného hospodárstva a tým generujú zamestnanosť v iných odvetviach.
4. Katalytické vplyvy – vplyvy súvisiace so širšou úlohou letiska v rozvoji regiónu. Zahŕňajú prínosy v iných odvetviach, ktoré prevádzka letiska daným odvetviam prináša. Ide o ekonomický rozvoj skrze obchod s tovarom či cestovný ruch a jeho služby [11, 28].

V rámci regiónu letiska Piešťany by rozvoj leteckej dopravy mal všetky zo spomenutých vplyvov. Priniesol by nové pracovné miesta priamo na letisku, spojené s jeho správou, s odbavovaním cestujúcich, službami bezpečnostnej kontroly. Pravdepodobne by vznikli i nové miesta v riadení letovej prevádzky a vzrástol by aj počet personálu pre manipuláciu s nákladom. Činnosť by mohli rozšíriť aj spomínaní externí dodávatelia, čo by opäť znamenalo prínos pre zamestnanosť a zdroj príjmov. Títo zamestnanci by samozrejme svoje príjmy miňali na rôzne životné potreby a tým by prispievali rastu národného hospodárstva v iných odvetviach. Napokon, rozšírenie prevádzky na letisku by pozitívne prispelo k rozvoju obchodu a cestovného ruchu v regióne, čo by znamenalo ekonomický rozvoj prostredníctvom týchto sektorov.

4. Cieľ a metodika

Hlavným cieľom článku je vykonanie návrhu rozvoja leteckej dopravy na letisku Piešťany. Základnou metódou, ktorú sme pre dosiahnutie tohto cieľa použili bola analýza. Tá bola zameraná na letisko Piešťany, kde informácie zhromaždené najmä z oficiálnej stránky letiska a tiež Leteckej informačnej príručky SR viedli k celkovej charakteristike tohto letiska. S cieľom vytýčiť jeho spádovú oblasť sme na základe odborných článkov vykonali komparáciu možných metód jej vytýčenia, pričom s ohľadom na charakter letiska sme zvolili metódu 60 minút jazdy autom. Informácie nadobudnuté analýzou odborných článkov a štúdií sme využili k popisu vplyvov leteckej dopravy na rozvoj regiónu.

Pre potreby návrhu rozvoja leteckej dopravy sme vytvorili dotazníkový prieskum, konkrétne tri dotazníky, aby boli pokryté tri základné cieľové skupiny. Dotazníky boli zostavené tak, aby odpovede poskytovali čo najkomplexnejší súbor informácií. Rozšírené boli medzi obyvateľov osobne či prostredníctvom sociálnych sietí, organizácie v cestovnom ruchu a priemyselné spoločnosti boli kontaktované prostredníctvom elektronickej pošty, pričom kontakty sme získali na ich internetových stránkach. Po získaní odpovedí sme výsledky jednotlivých dotazníkov vyhodnotili a interpretovali. Následne sme prostredníctvom komparácie a analýzy jednotlivých výsledkov dospeli k celkovým výsledkom prieskumu, na základe ktorých sme vytvorili návrh rozvoja leteckej dopravy na letisku Piešťany.

5. Návrh rozvoja leteckej dopravy v tomto regióne

Pre účely návrhu sme uskutočnili prieskum formou dotazníkov. Aby boli dáta čo najrelevantnejšie a aby prieskum pokryl čo najširšie spektrum záujmu, rozhodli sme sa uskutočniť prieskum pre tri rôzne cieľové skupiny zo spádovej oblasti letiska: obyvateľov, organizácie v cestovnom ruchu a priemyselné spoločnosti. Pre každú skupinu bol vytvorený samostatný dotazník, pričom každý z nich zisťuje potreby a záujem respondentov v týchto oblastiach o letecké spojenia v ich regióne.

5.1. Výsledky prieskumu pre obyvateľov

Odpovede sme získali od 72 respondentov. 80,6 % opýtaných v súčasnosti využíva leteckú dopravu, čo naznačuje vysokú mieru jej využívania obyvateľmi regiónu. Najviac frekventovanými krajinami kam cestujú je Turecko (13), Grécko (11), Taliansko (11), Španielsko (6) a Holandsko (5). Zároveň 9 respondentov sa vyjadrilo, že cestujú do rôznych európskych destinácií a 5 odpovedí zahŕňalo bližšie nešpecifikované "prímorské krajiny". Môžeme teda usúdiť, že obyvatelia regiónu najviac cestujú do prímorských dovolenkových destinácií ako Turecko a krajiny južnej Európy, a tiež menej často do rôznych európskych miest. Až 86,1 % respondentov by uvítalo nové letecké spojenia z Piešťan, čo znamená vysoký záujem obyvateľov o spojenia z tohto letiska. Destinácie, o ktoré majú obyvatelia najviac záujem sú uvedené v tabuľke č. 1:

Tabuľka 1 Záujem o nové spojenia z letiska Piešťany

Destinácia	Počet odpovedí
Grécko	16
Španielsko	14
Taliansko	13
Nemecko	7
Spojené kráľovstvo	6
Turecko	4
Holandsko	4
Dánsko	4

Zdroj: vlastné spracovanie dotazníkového prieskumu

Najčastejší účel týchto letov by bola dovolenka (83,9 %) a obyvatelia by ich využívali jeden až niekoľkokrát za rok. Na otázku, či by respondenti uprednostnili Piešťany pred okolitými letiskami ako Bratislava či Viedeň, až 63 zo 72 respondentov odpovedalo kladne. To znamená, že obyvatelia regiónu by preferovali odlietať z Piešťan, vďaka čomu by sa vyhlili nutnosti

cestovať pomerne veľké vzdialenosti na letiská Bratislava a Viedeň, ktorých služby využívajú v súčasnosti, čo by im ušetrilo čas aj finančné prostriedky. Podstatným faktom je aj to, že až dve tretiny opýtaných uprednostňuje nízkonákladové spoločnosti pred tými tradičnými, najmä kvôli nižším cenám leteniek. Dozvedeli sme sa tiež, že až 81,9 % respondentov by začalo leteckú dopravu využívať častejšie, ak by sa zaviedli nové letecké spojenia z Piešťan.

5.2. Výsledky prieskumu pre organizácie v cestovnom ruchu

V rámci prieskumu zameraného na cestovný ruch nám dotazník vyplnilo 24 zo 125 oslovených organizácií pôsobiach v tomto odvetví, v spádovej oblasti letiska Piešťany. Medzi respondentmi sú zastúpené rôzne druhy organizácií: hotely, kúpele, reštaurácie a turistické atrakcie. Až 22 z nich je v súčasnosti navštevovaných turistami zo zahraničia. Krajiny, z ktorých títo klienti najčastejšie prichádzajú sú uvedené v tabuľke č. 2, pričom všetci respondenti by uvítali zvýšenie návštevnosti týmito klientmi:

Tabuľka 2 Pôvod zahraničných klientov

Krajina	Počet odpovedí
Nemecko	14
Rakúsko	10
Česká republika	10
Poľsko	8
Ukrajina	6
Taliansko	4
Maďarsko	4
Spojené kráľovstvo	3

Zdroj: vlastné spracovanie dotazníkového prieskumu

91,7% organizácií by zároveň uvítalo príchod klientov z nových krajín. Najväčší záujem prejavili o klientov z Nemecka, Španielska, Francúzska či Dánska. Čo sa týka frekvencie ich príchodu, najčastejšie bola zvolená možnosť jedenkrát týždenne (40,9 %), následne viac ako jedenkrát týždenne (31,8%) a aspoň jedenkrát mesačne (13,6 %). Až 72,7 % z organizácií by teda uvítalo príchod nových klientov aspoň jedenkrát za týždeň, a až 86,3 % aspoň jedenkrát za mesiac.

5.3. Výsledky prieskumu pre priemyselné spoločnosti

Treťou oblasťou nášho prieskumu boli už spomenuté priemyselné spoločnosti v spádovej oblasti letiska Piešťany. Tu sa nám podarilo získať odpovede od 12 subjektov, zvyšok z 99 oslovených spoločností neprejavil o vyplnenie dotazníka záujem. Zistili sme, že 58 % z nich spolupracuje so zahraničnými partnermi alebo investormi, ktorí by mohli využívať leteckú dopravu do, resp. z Piešťan. Títo partneri najčastejšie sídlia v Nemecku (6 odpovedí). Respondentov sme sa tiež spýtali, či by pre tento účel boli vhodné skôr pravidelné lety alebo príležitostné, súkromné, tzv. business lety, a následne aj na ich frekvenciu. Všetkých 7 firiem hlasovalo za business lety, čo znamená, že návštevy nie sú pravidelné, alebo že daní zástupcovia preferujú cestovať súkromným spojmom. Ďalej sme zistili, že 50 % firiem zamestnáva pracovníkov zo zahraničia, a 66,7 % z nich by malo záujem o letecké spojenia pre týchto

pracovníkov do ich domovských krajín, ktorými je najmä Ukrajina, Srbsko či Rumunsko. Záver dotazníku bol zameraný na nákladnú leteckú dopravu. 58,3 % opýtaných firiem jej služby v súčasnosti využíva a rovnaké percento z nich by malo záujem o jej rozšírenie. Vo väčšine prípadov ide o prepravu vstupného materiálu do výroby. Konkrétne boli spomenuté predmety ako hliníkové a plastové komponenty, sklá, rámy, ložiská, rôznych materiálov pre automobilový priemysel či kompresory. Ide teda o náklad rozličných typov a rozmerov.

5.4. Štatistiky cestovného ruchu v regióne

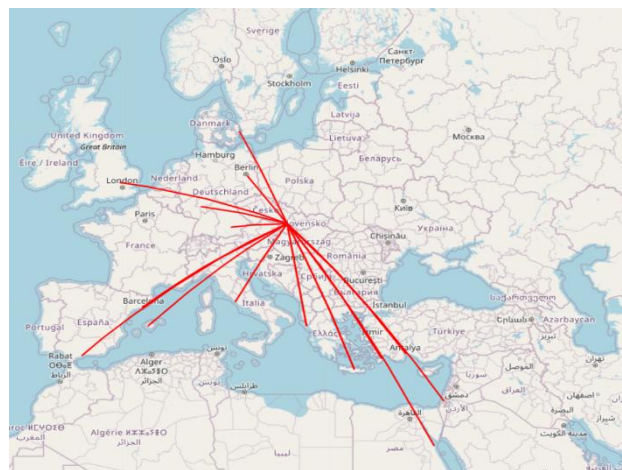
Aby sme lepšie pochopili tok zahraničných turistov v regióne a tiež podporili relevantnosť dát, rozhodli sme sa okrem výsledkov nášho dotazníkového prieskumu analyzovať tiež štatistiky týkajúce sa cestovného ruchu v Trnavskom samosprávnom kraji a následne so zameraním na región Piešťany, ktoré zverejnila Krajská organizácia cestovného ruchu Trnavský kraj. V roku 2023 dosiahol počet návštevníkov Trnavského samosprávneho kraja číslo 385 996, čo predstavovalo medziročný nárast o 17,3 %. Domáci návštevníci tvorili 55 %, teda okolo 212 tisíc, zahraničných turistov bolo teda okolo 174 tisíc. Čo sa týka počtu prenocovaní, v roku 2023 ich bolo zaznamenaných 1 316 604, čo predstavovalo medziročný nárast o 11 %, pričom priemerný počet prenocovaní dosiahol hodnotu 3,3. Zároveň je nutné poznamenať, že návštevnosť bola výrazne vyššia v letných mesiacoch, konkrétne v mesiacoch apríl až september bola vyššia až o takmer 75 % oproti zvyšným mesiacom [10]. K dispozícii sme mali štatistiku 12 krajín, odkiaľ v posledných rokoch prichádza najviac zahraničných návštevníkov. Veľký počet z nich prichádza z okolitých krajín ako Česká republika, Poľsko či Maďarsko. Tí kvôli relatívnej blízkosti využívajú pozemnú dopravu. O leteckú dopravu by mohli mať záujem najmä návštevníci z Nemecka, odkiaľ prichádza druhý najväčší počet, a tiež Francúzska, Izraela, Talianska, Spojeného kráľovstva či Španielska.

Letisko Piešťany sa nachádza na území oblastnej organizácie cestovného ruchu Rezort Piešťany, ktorá zahŕňa mestá Piešťany, Hlohovec a príslušné obce. Ide o druhú najviac navštevovanú oblasť Trnavského kraja. V roku 2023 sem zavítalo 121 891 návštevníkov, čo predstavuje až 31,6 % návštevníkov celého kraja a 2,13 % návštevníkov celej Slovenskej republiky. V počte prenocovaní, ktorých za rok 2023 bolo 605 037, je Rezort Piešťany v rámci kraja prvý [10]. To je spôsobené najmä prítomnosťou kúpeľov, kam klienti prichádzajú na dlhšie pobyty. Krajiny, z ktorých návštevníci najčastejšie prichádzajú sú rovnaké ako pri kraji, avšak s tým, že tu pozorujeme väčšiu návštevnosť cestujúcimi z Izraela, ktorí v pomerne veľkom počte navštevujú piešťanské kúpele.

5.5. Návrh leteckých spojení

Na základe výsledkov získaných v dotazníkovom prieskume v spojení so štatistikami daného regiónu sme vykonali návrh potenciálnych spojení, ktoré by mohli byť v budúcnosti z letiska Piešťany prevádzkované. Zo štatistik ako aj výsledkov prieskumu vyplýva, že obyvatelia regiónu najčastejšie cestujú do prímorských dovolenkových destinácií ako Turecko, Grécko, Taliansko a Španielsko. Potvrdzujú to aj odpovede na otázku, o aké nové destinácie by mali respondenti záujem, kde sa tieto krajiny opäť vyskytovali najčastejšie.

Navrhujeme charterové lety počas letnej sezóny do tureckého mesta Antalya a na grécke ostrovy Rodos, Kréta a Korfu, ktoré budú využívané dovolenkármi zo Slovenska. Počas leta rovnako navrhujeme lety do španielskych destinácií Barcelona, Malaga a Malorka, kde by boli vhodné ako charterové tak aj pravidelné lety. Pravidelný celoročný let by mohol byť prevádzkovaný do talianskeho Ríma, ktorý by využívali ako slovenskí tak aj talianski cestujúci prichádzajúci do regiónu. Ďalej navrhujeme zachovanie letov do letoviska Hurghada v Egypte a tiež letov do Izraela pre tamajších klientov prichádzajúcich do kúpeľov. Okrem spomenutých dovolenkových destinácií by na základe nášho prieskumu boli atraktívne aj lety z Piešťan do niektorých ďalších európskych miest. Veľký potenciál by podľa nás mohli mať lety do Nemecka, odkiaľ pochádza veľké množstvo zahraničných návštevníkov. Tu volíme spojenia do miest Berlín, Frankfurt a Mníchov. Medzi najviac využívané spojenia zo Slovenska patria lety do Spojeného kráľovstva, kde žije veľké množstvo Slovákov. Myslíme si, že záujem by bol o lety z Piešťan do Londýna. Atraktívne by mohli byť tiež lety do hlavného mesta Dánska - Kodane. Mapu týchto potenciálnych spojení môžete vidieť na obrázku č. 2:



Obrázok 2 Mapa potenciálnych spojení z letiska Piešťany

Zdroj: www.freemaptools.com, vlastné spracovanie

Dôležitým krokom je tiež výber leteckých spoločností, ktoré budú dané spojenia prevádzkovať a s tým prepojený výber použitých typov lietadiel. Charterové lety by mohla prevádzkovať spoločnosť Smartwings, ktorá dlhodobo spolupracuje so slovenskými cestovnými kanceláriami a realizuje väčšinu charterových letov zo Slovenska. Využívať pri tom môže lietadlá typu B737-800, B737 MAX 8 alebo tiež menšie B737-700. Okrem Smartwings môžu byť tieto lety prevádzkované samozrejme aj inými dopravcami, ktorí prejavia záujem, ako tomu bolo aj v sezóne 2024. Čo sa týka pravidelných letov, najvhodnejší by podľa nás boli nízkonákladoví dopravcovia Ryanair a Wizz Air. Takmer dve tretiny respondentov sa v našom prieskume vyjadrilo, že by uprednostnili práve tento typ leteckých spoločností. Tie by priniesli cenovo dostupnejšie letenky, čo by mohlo osloviť viac cestujúcich. Navyše tieto spoločnosti by mohli prejsť záujem o letisko Piešťany, keďže na rozdiel od tých tradičných, často lietajú aj na menšie letiská regionálneho charakteru. Spoločnosť Ryanair disponuje veľkým množstvom lietadiel B737-800 a B737 MAX 8. Wizz Air naopak využíva lietadlá Airbus, konkrétne typy A320 a o niečo väčšie A321. Všetky tieto typy vyhovujú

parametrom letiska Piešťany a tiež letísk v navrhovaných destináciách.

Náš návrh spojení z letiska Piešťany zahŕňa okrem destinácie aj navrhované použité letisko, frekvenciu letov, či ide o charterový alebo pravidelný let, a tiež či by bol prevádzkovaný celoročne alebo len počas letnej sezóny. Tento kompletný návrh je zobrazený v tabuľke č. 3:

Tabuľka 3 Návrh potenciálnych spojení z letiska Piešťany

Destinácia	Letisko	Frekvencia	Pravidelný/charterový	Celoročne/letná sezóna
Antalya	Antalya (LTAI)	5x týždenne	charterový	letná sezóna
Rodos	Rhodos Diagoras (LGRP)	2x týždenne	charterový	letná sezóna
Kréta	Heraklion Nikos Karatzakis (LGIR)	2x týždenne	charterový	letná sezóna
Korfu	Ioannis Kapodistrias (LGKR)	2x týždenne	charterový	letná sezóna
Rím	Fiumicino Leonardo da Vinci (LIRF)	2x týždenne	pravidelný	celoročne
Barcelona	El Prat (LEBL)	1-2x týždenne	pravidelný/charterový	letná sezóna
Malaga	Malaga-Costa del Sol (LEMG)	1-2x týždenne	pravidelný/charterový	letná sezóna
Malorka	Palma de Mallorca (LEPA)	1-2x týždenne	pravidelný/charterový	letná sezóna
Hurgada	Hurgada (HEGN)	1x týždenne	charterový	letná sezóna
Berlin	Berlin Brandenburg (EDDB)	2x týždenne	pravidelný	celoročne
Frankfurt	Frankfurt (EDDF)/ Frankfurt Hahn (EDFH)	2x týždenne	pravidelný	celoročne
Mnichov	Munich (EDDM)/ Munich (EDIA)	2x týždenne	pravidelný	celoročne
Londýn	London Luton (EGGW)	2x týždenne	pravidelný	celoročne
Kodaň	Copenhagen Kastrup (EKCH)	2x týždenne	pravidelný	celoročne
Tel Aviv	Ben Gurion (LLBG)	1x týždenne	pravidelný	letná sezóna

Zdroj: vlastné spracovanie

Je nutné poznamenať, že ak by malo skutočne dôjsť k zavedeniu niektorých zo spojení, bude potrebná dôkladná a podrobná analýza trhu zo strany leteckej spoločnosti či cestovnej kancelárie, prostredníctvom ktorej sa zistí, či by dané spojenia boli rentabilné, čo sa však môže ukázať až časom. Letecká spoločnosť taktiež na základe vlastných analýz môže navrhnúť spojenia do iných destinácií či pozmeniť ich frekvenciu. Avšak myslíme si, že náš návrh môže poskytnúť dobrý základ pri budúcom výbere leteckých spojení z letiska Piešťany, či už pre potreby samotného letiska alebo leteckých spoločností.

Záver

Letecká doprava má výrazný vplyv na jednotlivé regióny krajín, a to z hľadiska cestovného ruchu, priemyslu a tiež potrieb samotných obyvateľov. Letisko Piešťany je občas podceňovaným, ale podľa nás dôležitým prvkom, ktorý má potenciál rozvíjať svoj región. Dôležité je však efektívne financovanie nastavené tak, aby letisko poskytovalo dostatočnú kapacitu a kvalitné služby, a aby náklady dopravcov neboli príliš vysoké. Pre rozvoj takéhoto letiska je mimoriadne dôležitá finančná pomoc zo strany štátu, či už vo forme investícií alebo

prevádzkovej pomoci, ktorej cieľom je aj práve regionálny rozvoj [11]. Veríme, že so správnou podporou od štátu a propagáciou u leteckých spoločností, má letisko Piešťany potenciál stať sa opäť významným slovenským letiskom a napomáhať k rozvoju svojho regiónu.

Referencie

- [1] KRUPA, Vladimír (2021). Civilné letisko Piešťany – nová kniha o jeho histórii. Online. Piešťanský denník. 21.11.2021. Dostupné na: <https://www.piestanskyydennik.sk/2021/11/21/civilne-letisko-piestany-nova-kniha-o-jeho-historii/>.
- [2] LPS SR (bez dáta). *Letecká informačná príručka SR*. Online. Dostupné na: https://aim.lps.sk/eAIP/eAIP_SR/AIP_SR_EFF_08AUG2024_amdt/html/LZ-frameset-sk-SK.html.
- [3] LETISKO PIEŠŤANY A. S. (2024). *Letový poriadok*. Online. Dostupné na: <https://airport-piestany.sk/letovy-poriadok/>.
- [4] TRNAVSKÝ SAMOSPRÁVNÝ KRAJ (2024). *Letná charterová sezóna na piešťanskom letisku štartuje. Pribudne viac letov i obnovené pravidelné spojenie s Izraelom*. Online. Dostupné na: <https://trnava-vuc.sk/letna-charterova-sezona-na-piestanskom-letisku-startuje-pribudne-viac-letov-i-obnovene-pravidelne-spojenie-s-izraelom/>.
- [5] EUROPEAN COMMISSION (2014). *Communication from the Commission - Guidelines on State aid to airports and airlines*. Online. Brusel, 2014. Dostupné na: https://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/ia_carried_out/docs/ia_2014/c_2014_0963_en.pdf.
- [6] NOVÁK SEDLÁČKOVÁ, Alena a ŠVECOVÁ, Denisa (2018). *The regional airports position within the Slovak Republic: The case study of Piešťany Airport and the proposal of measures for its revitalization*. Online. Transportation Research Procedia. Elsevier, 2018. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146518303673>.
- [7] JENČOVÁ, Edina; VAGNER, Juraj; TOBISOVÁ, Alica a ROZENBERG, Róbert (2017). *Ekonomické a sociálne prínosy leteckej dopravy*. Online. Letecká fakulta Technickej univerzity v Košiciach. Dostupné na: <https://pp.fberg.tuke.sk/optilog/pub17/lf/184026.pdf>.
- [8] NGUYEN, Quang Hai (2022). *The causality between air transport and economic growth: Empirical evidence from regions in Asia*. Online. Research in Transportation Business & Management. Elsevier, 2023. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210539523000044>.
- [9] HALPERN, Nigel a BRÄTHEN, Svein (2011). *Impact of airports on regional accessibility and social development*. Online. Journal of Transport Geography. Elsevier, 2011. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0966692310001882>.

- [10] KRAJSKÁ ORGANIZÁCIA CESTOVNÉHO RUCHU TRNAVSKÝ KRAJ (2024). *Správa o činnosti a účtovná uzávierka za rok 2023*. Online. Dostupné na: https://kocrtt.sk/wp-content/uploads/2024/11/Sprava-o-cinnosti-KOCR-TK_2023_komprimovane.pdf.
- [11] TOMOVÁ, Anna; Kirschnerová, Ivana a Havel, Karel (2016). *Ekonomika letísk*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline. ISBN 978-80-554-1257-3.



PREVÁDZKOVO-TECHNICKÉ VÝCHODISKÁ KONCEPCIE BWB LETÚNOV

Simona Kováčová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Filip Škultéty
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The Blended Wing Body is a revolutionary aircraft concept with the potential to surpass present-day conventional aircraft regarding aerodynamic efficiency, and to lower the environmental impact of the aviation industry. However, despite over thirty years of contemporary research, there is still no operational blended wing body airliner, suggesting the presence of multiple unresolved issues pertaining to this design. This article investigates various operational and technical aspects related to the design process of BWB aeroplanes and their influence on the resulting aerodynamic performance. The aim of this work is a multidisciplinary analysis with focus on aircraft structure, operational safety and ultimately on the inter-comparison of required and achievable flight characteristics.

Keywords

aerodynamics, blended wing body, aircraft design, efficiency, flight characteristics

1. Úvod

Bezchvosté lietadlá a lietajúce krídla nie sú v leteckom priemysle novinkou. Tieto typy lietadiel ale boli historicky sprevádzané problémami a len veľmi málo z nich sa dostalo do prevádzky. Nátlak na efektívnosť a zníženie spotreby paliva v leteckej doprave však v súčasnosti motivuje výrobcov lietadiel opätovne skúmať nekonvenčné koncepcie, vrátane koncepcie blended wing body (BWB).

2. Metodika a metódy skúmania

Cieľom práce bolo poskytnúť komplexný náhľad do problematiky prevádzkovo-technických determinantov BWB letúnov v kontexte ich aerodynamických vlastností. V rámci sekundárneho výskumu boli analyzované predošlé práce venované tejto téme, so zameraním na viacero aspektov.

Kľúčovými bodmi boli výhody BWB koncepcie, nároky na konštrukciu letúna z hľadiska veľkosti, kapacity a schopnosti prenášať zaťaženia vyvolané aerodynamickými silami a diferenciálnym tlakom zároveň. Taktiež boli skúmané požiadavky na letové vlastnosti a bezpečnosť letúna.

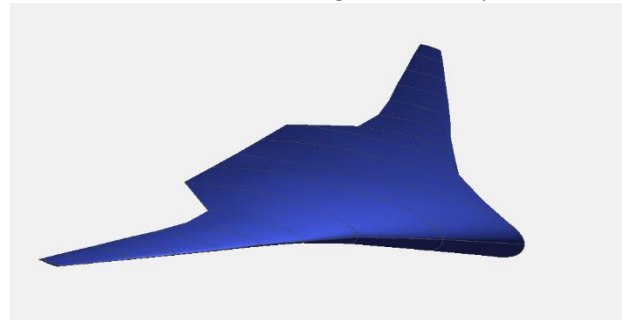
Výsledkom analýzy bol súhrn charakteristík, ktoré sú od letúna požadované. Ďalším krokom bolo overenie aerodynamických vlastností vybraného BWB letúna a ich komparácia so stanovenými požiadavkami. Letún použitý v analýze bol vytvorený na báze modelu SE²A [1], ktorý bol optimalizovaný pre transonické rýchlosti. Otázkou bolo, či takýto model bude mať prijateľné vlastnosti aj na nízkych rýchlostiach.

Pre vykonanie počiatočných simulácií bol zvolený program XFLR5. Tento softvér dokáže predpovedať parametre neviskózneho, nerotačného prúdenia tekutiny na báze Eulerových rovníc, je preto vhodný pre vyššie Reynoldsove čísla a nízke uhly nábehu. Má však limitácie, ktoré sa prejavujú ak je charakter prúdenia turbulentný, konkrétne nadhodnocovanie aerodynamickej jemnosti a neschopnosť pracovať s odtrhnutou medznou vrstvou [2].

Z dôvodu týchto obmedzení boli získané údaje dodatočne overené v programe Ansys Fluent. Tu bol vykonaný menší počet simulácií a chýbajúce hodnoty uhlov nábehu boli doplnené prostredníctvom extrapolácie. Úlohou dodatočných simulácií bolo predovšetkým potvrdiť použiteľnosť údajov získaných v XFLR5 pre potreby výskumu.

Model v XFLR5 bol vytvorený z 10 profilov, ktoré boli nakreslené prostredníctvom aproximačných kriviek na základe grafického zobrazenia v pôvodnej publikácii [1]. Jeho rozpätie bolo 0,3 m, obsah nosnej plochy bol 0,018 m² a uhol šípku bol 37,4°. Identický model bol vytvorený v programe Autodesk Inventor, ten bol pre ďalšiu analýzu importovaný do programu Ansys.

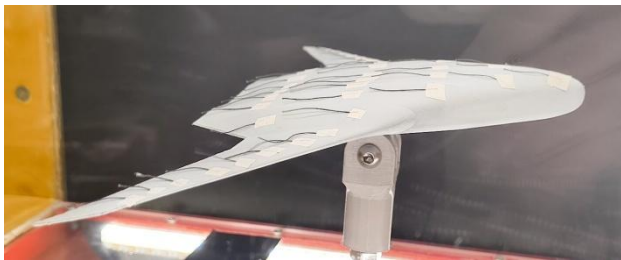
Samotné simulácie boli vykonané pri rýchlosti 20 m/s pri uhloch nábehu -5°- 15° v XFLR5, skonvergovali však len po uhle 8°, kde



Obrázok 1 Model BWB letúna v XFLR5 (Zdroj: autor)

začalo dochádzať k odtrhaniu prúdnic od koncov krídel dovnútra. V programe Ansys boli analyzované uhly nábehu 0°, 5° a 10°.

V poslednej fáze praktického výskumu bol vytlačený 3D model predmetného BWB letúna, na ktorom boli uskutočnené pozorovania vo veternom tuneli pre posúdenie charakteru prúdenia v jednotlivých sekciách telesa. Prínosom tejto formy pozorovania mal byť predovšetkým náhľad do aerodynamiky letúna na vysokých uhloch nábehu, ktorej pochopenie je nutné obzvlášť vo fázach vzletu a pristátia.



Obrázok 2 Model vo veternom tuneli (Zdroj: autor)

3. Výsledky

Analýza prevádzkovo-technických aspektov koncepcie BWB ukázala, že letúny tohto typu majú mnoho výhod, no boli identifikované aj slabé stránky, ktoré vyžadujú riešenia.

3.1. Príležitosti

Najväčšou výhodou BWB letúnov je menšia obtekaná plocha v porovnaní s konvenčnými letúňmi, vďaka čomu je ich trecí odpor nižší. Plynulý prechod trupu a krídla znižuje interferenčný odpor, celková spotreba paliva sa teda zníži [3]. Aerodynamický čistejší tvar a umiestnenie pohonných jednotiek na vrch trupu letúna má tiež potenciál znížiť hlukovú stopu letúna. Okrem toho, jedinečný tvar trupu umožňuje nové usporiadania kabíny a rovnomerná výška stropu dodá pocit priestranosti, zvyšujúc komfort cestujúcich.

3.2. Výzvy

Jednou z hlavných výzev návrhu BWB letúna je nájdenie rovnováhy medzi výkonnosťou v cestovnom režime a ostatnými aspektami prevádzky.

3.2.1. Aerodynamika

Absencia chvostových plôch komplikuje stabilitu a riaditeľnosť letúna. Pozdĺžnu stabilitu možno riešiť viacerými spôsobmi: použitím autostabilných profilov v oblasti trupu, záporným skrútením koncov krídel, obe však navyšujú odpor lietadla. Tretím variantom je použitie výrezu pod nábežnou hranou trupového profilu [4]. Toto riešenie bolo navrhnuté pre BWB letún SAX-40, no vyžaduje si ďalší výskum [5].

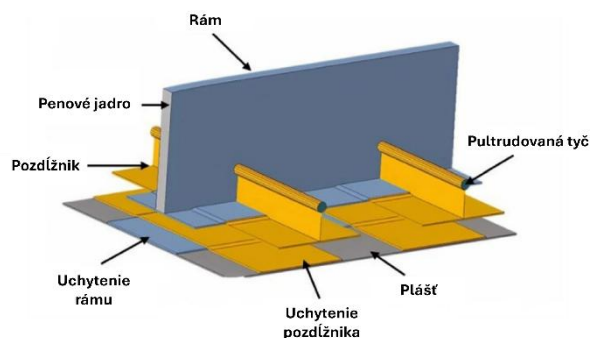
Priečna a stranová stabilita môže byť zabezpečená wingletmi alebo vertikálnymi stabilizátormi, ich účinnosť je však obmedzená krátkou vzdialenosťou od ťažiska. Celkovo pre BWB koncepciu platí, že nie je možné zabezpečiť rovnakú úroveň stability ako u konvenčného letúna. Je totiž potrebné brať ohľad nielen na výkonnosť, ale aj na riaditeľnosť letúna, keďže dĺžka páky riadiacich plôch je tu relatívne krátka. Ďalším nárokom na BWB letúny je teda aj výkonná a dynamická silová sústava spolu so systémami stabilizácie riadenia.

V neposlednom rade je podstatná výkonnosť pri nízkych rýchlostiach. Absencia horizontálnej chvostovej plochy by BWB letúnu neumožnila kompenzovať klopivý moment vyvolaný komplexnou vztlakovou mechanizáciou, preto musí byť schopný vytvárať dostatočnú vztlakovú silu na nízkej rýchlosti aj bez nej [5].

3.2.2. Konštrukcia

Dôležitou otázkou je tiež konštrukcia trupu, ktorý je súčasťou nosnej plochy, ale zároveň je pretlakovaný. Jeho ploský tvar prenáša zaťaženie diferenciálnym tlakom horšie než konvenčné konštrukcie s kruhovým prierezom, čo komplikuje situáciu, obzvlášť keď je cieľom zachovať nízku hmotnosť letúna.

Možným riešením by mohlo byť použitie kompozitnej štruktúry PRSEUS, ktorá pozostáva z penových rámov, pozdĺžnikov a je zosilnená pultrudovanými tyčami. Jegley et al [6] preukázali, že kabína pozostávajúca z panelov vytvorených touto technológiou dokáže vydržať zaťaženia v prevádzkovom rozsahu, ktoré pre dopravné lietadlá vymedzuje CS-25.



Obrázok 3 Štruktúra PRSEUS Zdroj: [7]

3.2.3. Bezpečnosť a komfort cestujúcich

Pri návrhu dopravného letúna je potrebné zohľadniť možnosť evakuácie cestujúcich. Súčasné návrhy BWB koncepcie sú zvyčajne strednoplošníky, poprípade hornoplošníky, čo obmedzuje počet a rozmiestnenie núdzových východov. U strednoplošníkov je možné umiestniť východy len do prednej a zadnej časti lietadla, čo znamená, že množstvo cestujúcich bude od najbližšieho východu ďaleko. Najväčšie riziko hrozí v prípade zablokovania všetkých východov v zadnej časti letúna, napr. v prípade požiaru [8]. V prípade hornoplošníka je možné umiestniť východy aj po bokoch lietadla, ale je potrebné zvážiť možnosť poškodenia krídel pri náraze [9].

V neposlednom rade, nároky na pohodlie cestujúcich takisto ovplyvňujú návrhový proces. Uhol kabíny v cestovnom režime by nemal presahovať 3° , teda aj optimálny uhol nábehu pre tento režim by mal byť nízky. Taktiež je potrebné limitovať šírku kabíny, keďže vyššie uhly náklonu a vybočenia by mohli byť nepríjemné pre cestujúcich sediacich ďaleko od osi otáčania [3].

3.3. Analýza aerodynamických vlastností

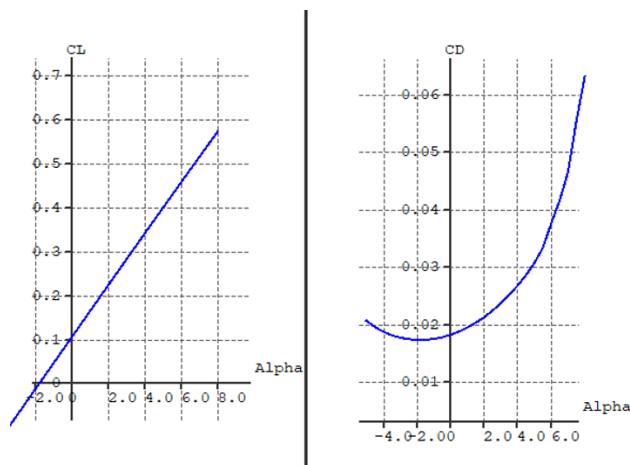
Cieľom analýzy aerodynamických vlastností BWB letúna v programe XFLR5 bolo získať nasledujúce údaje:

- Informácie o rozložení vztlakovej a odporovej sily.
- Priebeh súčiniteľa vzlaku (C_L) a odporu (C_D) v závislosti od uhla nábehu (α) a ich vzájomný vzťah,
- Momentovú krivku letúna pre posúdenie pozdĺžnej stability,

Rozloženie vztlakovej sily bolo zmiešané, trojuholníkovovo-eliptické. Pozorovaných bolo zopár nerovností, pravdepodobne

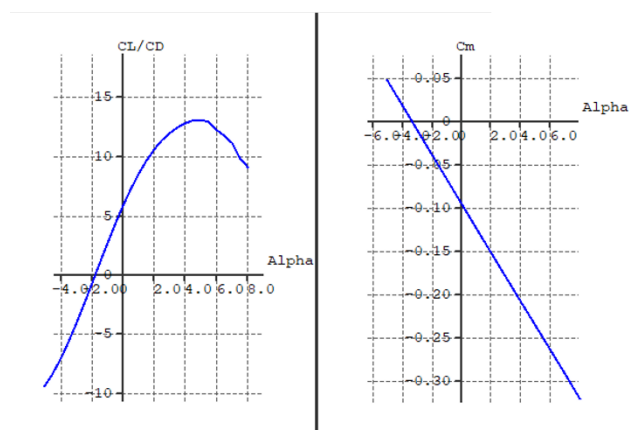
vplyvom nepresností pri návrhu profilov. Pôsobisko vztlaku bolo v zásade viac vpred v koncových častiach krídla, kým na trupe bolo typicky až v druhej polovici dĺžky tetivy.

Na Obrázku 4 sa nachádzajú grafy C_L a C_D v závislosti od uhla nábehu. Pretože simulácia skonvergovala iba po $\alpha = 8^\circ$, nebolo možné určiť maximálny súčiniteľ vztlaku ani kritický uhol nábehu. Záznam z priebehu analýzy však indikoval postupné prekročenie miestnych C_{Lmax} počínajúc na koncoch krídla od uhlov nábehu nad 8° , čo implikuje odtrhnutie medznej vrstvy v týchto oblastiach. Čo sa týka súčiniteľa odporu, minimálna hodnota 0,017 je dosiahnutá približne pri $\alpha = -2^\circ$.



Obrázok 4 Vztlaková a odporová krivka BWB letúna (Zdroj: autor)

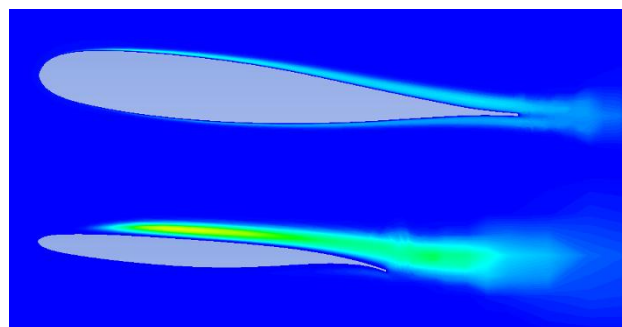
Obrázok 5 znázorňuje závislosť aerodynamickej jemnosti od uhla nábehu a momentovú krivku. Maximálna aerodynamická jemnosť v hodnote 12,96 je dosiahnutá je pri $\alpha = 4,5^\circ$. Pri pohľade na momentovú krivku možno vidieť, že má klesajúcu tendenciu, indikujúcu statickú stabilitu lietadla. Nulový súčiniteľ klopivého momentu (C_m) je však dosiahnutý pri zápornom uhle nábehu. Lietadlo tým pádom nie je možné vyvážiť vo vodorovnom lete. Táto vlastnosť vyplýva z návrhu letúna, v ktorom neboli uplatnené žiadne metódy zaistenia pozdĺžnej stability.



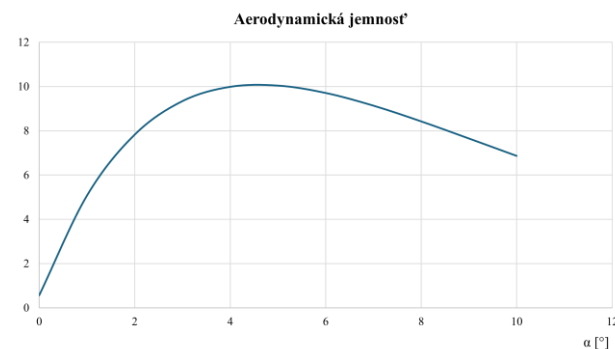
Obrázok 5 Aerodynamická jemnosť a momentová krivka letúna (Zdroj: autor)

Simulácie v programe Ansys slúžili pre overenie získaných hodnôt a pre vykreslenie tlakových polí okolo jednotlivých

profilov. Keďže Ansys využíva metódu RANS, nemá rovnaké obmedzenia ako XFLR5, bolo tu teda možné vidieť aj turbulentné prúdenie, ktoré bolo obzvlášť výrazne na konci krídla (viď. Obrázok 6). Maximálna dosiahnutá aerodynamická jemnosť tu bola iba 10, čo je o 23% menej v porovnaní s XFLR5. Taktiež nastala pri vyššom uhle nábehu – 5° . Jej priebeh je znázornený na Obrázku 7.



Obrázok 6 Porovnanie prúdenia na vnútornom a koncovom profile krídla (Zdroj: autor)



Obrázok 13 Aerodynamická jemnosť v programe Ansys (Zdroj: autor)

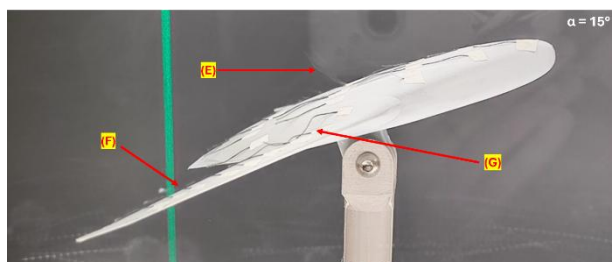
Na záver bol skúmaný charakter prúdenia na vysokých uhloch nábehu vo veternom tuneli. Počas pozorovania bolo zrejmé, že k separácii medznej vrstvy dochádza najprv na vonkajšom krídle. Pri $\alpha = 10^\circ$ boli prúdnicie až po spojnicu krídla a trupu plne odtrhnuté, pričom v tejto oblasti dochádzalo aj k výraznému zosúvaniu prúdenia smerom von. Prúdenie okolo trupu bolo pri tomto uhle stále laminárne, ako možno vidieť na Obrázku 8.



Obrázok 7 Veterný tunel pri $\alpha = 10^\circ$

K úplnému odtrhnutiu prúdnic došlo až okolo uhla nábehu 15° (viď. Obrázok 9). Tu už možno pozorovať turbulentné prúdenie aj nad trupovou časťou. Tiež je tu evidentné zosúvanie medznej vrstvy na spojke krídla a trupu. Pozorovania vo veternom tuneli však svedčia tomu, že BWB letún je schopný vytvárať dostatočné množstvo vztlaku aj pri vysokých uhloch nábehu. Problémové sú

konce krídel, kde by ale bolo možné oddialiť odtrhnutie medznej vrstvy pomocou vztlačovej mechanizácie.



Obrázok 8 Veterný tunel pri $\alpha = 15^\circ$ (Zdroj: autor)

4. Záver

V tomto článku boli opísané hlavné výhody a nevýhody BWB koncepcie spolu s výsledkami analýzy aerodynamických vlastností modelu vybraného letúna. Je zrejmé, že stále existujú oblasti vyžadujúce ďalší výskum, najmä čo sa týka konštrukcie, stability, riaditeľnosti a letu na nízkych rýchlostiach. Súčasné trendy sú však pozitívne, preto je možné predpokladať, že rozvoj nových technológií eventuálne umožní konštrukciu plne funkčného dopravného BWB lietadla.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

1. KARPÚK, S. et al. Multi-Fidelity Design Optimization of a Long-Range Blended Wing Body Aircraft with New Airframe Technologies. In *Aerospace*. 2020. Vol. 7, no. 7, s. 87. DOI: 10.3390/aerospace7070087.
2. xflr5. [cit. 2025-04-20]. Dostupné na internete: <<https://www.xflr5.tech/xflr5.htm>>.
3. LIEBECK, R.H. Design of the blended wing body subsonic transport. In *Journal of Aircraft*. 2004. Vol. 41, no. 1, s. 10–25. DOI: 10.2514/1.9084.
4. SARGEANT, M.A. et al. Stability of Hybrid-Wing-Body-Type Aircraft with Centerbody Leading-Edge Carving. In *Journal of Aircraft*. 2010. Vol. 47, no. 3, s. 970–974. DOI: 10.2514/1.46544.
5. CHEN, Z. et al. Assessment on critical technologies for conceptual design of blended-wing-body civil aircraft. In *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019. Vol. 32, no. 8, s. 1797–1827. DOI: 10.1016/j.cja.2019.06.006.
6. JEGLEY, D.C. et al. Structural Response of a Stitched Composite Hybrid Wing Body Center Section. In *Journal of*

Aircraft. 2021. Vol. 58, no. 3, s. 580–590. DOI: 10.2514/1.C035911.

7. MUKHOPADHYAY, V. Blended Wing Body (BWB) Fuselage Structural Design for Weight Reduction. In 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference [online]. 2005. [cit. 2025-04-03]. Dostupné z: <<https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2005-2349>>.
8. CHEN, K. et al. Modeling and evaluating passenger evacuation and risk in blended wing body aircraft using continuous displacement agents. In *Discover Applied Sciences*. 2025. Vol. 7, no. 1, s. 48. DOI: 10.1007/s42452-024-06325-y.
9. ZHANG, Y. - WANG, H. Crashworthiness analysis of PRSEUS-based Blended-Wing-Body civil aircraft. In *Aerospace Science and Technology*. 2024. Vol. 146. DOI: 10.1016/j.ast.2024.108927.



ANALÝZA VPLYVU TVARU ZAKONČENIA KRÍDLA NA JEHO AERODYNAMICKÉ VLASTNOSTI

Jakub Kremnický
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jakub Jackuliak
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The goal of this thesis is to investigate the different types of wingtip solutions, their historical development, current use and potential directions of further development. The basic aerodynamic principles influencing the airflow around the wing, the formation of vortex flow and the possibilities of its minimization by means of a suitable shape of the wingtip are described. Based on the analysis of different types of wingtips, ranging from simple fixed solutions to advanced active and mechanized concepts, the thesis proposes and evaluates the potential use of fixed, active and variable wingtips, as well as theoretical concepts of mechanization of current solutions and their application in practice. The final part of the thesis summarizes the knowledge gained, compares the advantages and limitations of the different wingtip solutions and outlines the perspectives for the future development of wing terminations. Thus conceived, the thesis provides not only an overview of current technologies, but also a proposal for an innovative solution with the potential to contribute to increasing the sustainability of future concepts.

Keywords

Wingtip, Winglet, Aerodynamic efficiency, Aerodynamics

1. Úvod

Aerodynamická optimalizácia krídla patrí medzi kľúčové faktory pre zvyšovanie efektivity letu. Krídla sú jednoznačne jednou z najdôležitejších častí lietadla. Keďže ide o jednu z najväčších nosných plôch na lietadle, kladie sa veľký dôraz na ich tvar a optimalizáciu aerodynamických vlastností. Hoci zakončenie krídla tvorí len malú časť jeho celkovej plochy, významne ovplyvňuje rozloženie tlakových polí, vznik vírových prúdov na špičkách a tým aj celkovú aerodynamickú jemnosť.

Každé zakončenie krídla inak ovplyvňuje aerodynamické vlastnosti krídla, umožňuje to využívať rôzne druhy zakončenia krídel pre rôzne využitia v lete. Vhodne zvolený tvar zakončenia krídla môže výrazne zlepšiť aerodynamickú efektívnosť a tým prispieť k zlepšeniu palivovej efektivity, predĺženiu doletu a zníženiu emisií.

Cieľom tejto práce je systematicky analyzovať vplyv rôznych tvarov zakončení krídla na jeho základné aerodynamické vlastnosti – najmä vplyv na indukovaný odpor, efektívnu štihlosť a celkovú aerodynamickú jemnosť. Súčasne skúma potenciálne smery ďalšieho rozvoja týchto technológií a navrhuje koncepty využitia mechanizovaných i aktívnych zakončení v pre civilné letectvo.

2. Aerodynamika zakončení krídel

Na pochopenie aerodynamiky zakončení krídel musíme najprv pochopiť ako funguje aerodynamika a obtekanie okolo samotného krídla. Znalosť aerodynamiky je základom pre pochopenie riadenia lietadla. Umožňuje nám určiť schopnosť generovať vztlak, minimalizovať odpor a optimalizovať celkovú účinnosť letu.

Pre pochopenie správania sa pohybu kvapalín a plynov okolo telesa musíme najprv porozumieť základným aerodynamickým princípom:

- Bernuliho princíp
- Zákon akcie a reakcie
- Kutta-Joukowski princíp

Tieto princípy nám umožňujú predpovedať správanie sa tekutiny okolo telesa. V našom prípade nám dokážu predpovedať správanie sa krídla v rôznych situáciách počas letu a optimalizovať jeho tvar na koncoch krídla.

Vzduch prúdiaci okolo lietadla alebo akéhokoľvek iného telesa sa musí odkloniť od svojej pôvodnej dráhy a takéto odklony vedú k zmenám rýchlosti vzduchu. Bernoulliho rovnica ukazuje, že tlak, ktorým vzduch pôsobí na lietadlo, sa mení oproti tlaku nerušeného prúdu. Aj viskozita vzduchu vedie k existencii trecích síl, ktoré majú tendenciu kľásť odpor jeho prúdeniu. Výsledkom týchto procesov je výsledná aerodynamická sila a moment [1].

2.1. Koefficient odporu a vztlaku

Statický tlak sa zvyšuje v prednej časti telesa obtekaného telesa a znižuje v oblasti zadnej časti, kde vzduch víri. Sila alebo odpor spôsobený týmito tlakovými rozdielmi vyplývajúcimi z dynamického pohybu okolo telesa bude pôsobiť v smere prúdenia. Okrem tohto takzvaného tvarového odporu vzniká aj sila spôsobená priamym trením častíc vzduchu o povrch telesa. Obe tieto sily tvoria výsledný odpor telesa [2].

Veľkosť odporu závisí od:

- prierezu telesa S (priemet telesa v smere prúdenia),
- Vhodnosti aerodynamického tvaru telesa vyjadreného koeficientom odporu C_D

- Dynamického tlaku q , ktorý zahŕňa vplyv rýchlosti prúdenia a hustoty vzduchu

Hodnota odporu D bude vyjadrená vzťahom:

$$D = C_D \cdot q \cdot S [m] \quad (1)$$

Kde: C_D je koeficient odporu, S je plocha, q je dynamický tlak

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2)$$

Kde: ρ je hustota vzduchu [kg.m-3], v je rýchlosť prúdenia [m.s-1]

Koeficient odporu C_D sa určuje pomocou telesa určitého tvaru, na ktoré pôsobí prúd vzduchu s určitou rýchlosťou, pôsobí aerodynamická sila - odpor vzduchu, ktorého veľkosť možno určiť určením hmotnosti. Ak získanú hodnotu vydáme hodnotou odporu podľa plochy telesa S a dynamického tlaku q , dostaneme koeficient odporu [2].

$$C_D = D / (S \cdot q) \quad (3)$$

Kde: C_D je koeficient odporu, D je hodnota odporu, S je plocha, q je dynamický tlak

Takto získaný koeficient odporu vzduchu C_D zodpovedá určitému tvaru a veľkosti telesa a určitej rýchlosti prúdenia vzduchu. Ak sa podmienky zmenia, koeficient odporu vzduchu bude mať tiež inú hodnotu. Koeficient odporu vzduchu sa preto môže použiť len za podmienok, pri ktorých bol nameraný. Na vyjadrenie podobnosti podmienok sa používa takzvané Reynoldsovo číslo Re [2].

$$Re = \frac{1}{\nu} \cdot v \cdot l \quad (4)$$

Kde: Re je Reynoldsovo číslo, v je rýchlosť pohybu [m.s-1], l je charakteristický rozmer (hĺbka) [m], ν je kinematická viskozita vzduchu

Na základe predošlých postupov vieme takto dostať aj vzorec pre výpočet vztaku:

$$L = C_L \cdot q \cdot S [N] \quad (5)$$

a odvodiť z neho vzťah pre koeficient vztaku:

$$C_L = L / (q \cdot S) \quad (6)$$

Kde: L je vztlak, C_L je koeficient vztaku, q je dynamický tlak, S je plocha

2.2. Indukovaný odpor

Indukovaný odpor je spôsobený nerovnomerným rozložením tlaku nad a pod krídlom. Z oblasti pod krídlom, kde je tlak vyšší, sa vzduch snaží dostať do oblasti s nižším tlakom nad krídlom, snaží sa vyrovnáť tlak. Tým vznikajú indukované víry na konci krídla [3].

Indukovaný odpor môžeme vyjadriť pomocou vzorca, kde veľkosť indukovaného odporu závisí od rýchlosti letu a koeficientu indukovaného odporu [2].

$$D_i = \frac{1}{2} \times C_{Di} \times \rho \times v^2 \times S \quad (7)$$

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{AR \times \pi} \times (1 + \delta) \quad (8)$$

Kde: D_i je indukovaný odpor, C_{Di} je koeficient indukovaného odporu, ρ je hustota vzduchu, v je rýchlosť pohybu, S je plocha, C_L je koeficient vztaku, AR je štiňlosť krídla, δ je korekčný faktor.

Veľkosť koeficientu indukovaného odporu rastie s koeficientom vztaku C_L a klesá s rastúcou štiňlosťou AR [2].

2.3. Vztakom indukovaný odpor

Na kompletom lietadle vedie interferencia na spojeniach krídlo/trup, krídlo/winglet a iných podobných spojeniach k modifikácii hraničných vrstiev nad izolovaným krídlom, trupom atď. Táto interferencia, ktorá je vlastne súčasťou profilového odporu, sa zvyčajne mení s koeficientom vztaku. Časť tohto koeficientu profilového odporu sa môže pripočítať k indukovanému odporu. Takto získaný súčet je známy ako koeficient odporu závislý od vztaku. Odpor závislý od vztaku je teda definovaný ako rozdiel medzi odporom pri danom koeficiente vztaku a odporom pri určitom vzťažnom vztakovom koeficiente [1].

2.4. Aerodynamická jemnosť

Dôležitým prvkom pri zakončeníach krídiel je ohodnotenie ich aerodynamickej jemnosti. Jemnosť pri vysokých rýchlostiach sa meria ľahšie a zvyčajne sa meria vplyv na odpor vzduchu indukovaný vztakom. To umožňuje uviesť jemnosť vo forme relatívne ľahko porovnateľného ukazovateľa, ako je efektívna zmena štiňlosti krídla, označovaná ΔAR . Hodnota konkrétneho zakončenia krídla sa teda môže vyhodnotiť tak, že sa zohľadní pri odhade odporu pri analýzach výkonnosti [4].

Cieľom je upraviť odpor indukovaný vztakom takto:

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi \times (AR + \Delta AR) \times e} \quad (9)$$

Kde: C_{Di} je koeficient indukovaného odporu, C_L je koeficient vztaku pri určitom referenčnom letovom stave, AR je štiňlosť základného krídla, ΔAR je efektívna zmena štiňlosti krídla, e je účinnosť Oswaldovho rozpätia pôvodného krídla

Za predpokladu, že základné krídlo upravíme namontovaním istého typu zakončenia na koncoch krídla, dostaneme prírastok k rozpätiu krídla na každom konci krídla. Hoci sa tým zväčší rozpätie aj plocha krídla, budeme považovať referenčné rozpätie aj plochu za nezmenené. Rozdiel v Oswaldovej účinnosti oboch porovnávaných vyplýva výlučne z prídania určitého krídla konečnej štiňlosti ΔAR , k základnému AR . To možno odôvodniť na základe pozorovania, že pokiaľ ide o odpor indukovaný vztakom, dôležitý je súčin $AR \cdot e$ a nie AR alebo e samotné. Preto môžeme upraviť buď AR , alebo e , alebo ich súčin. Tu však budeme pre praktickosť uvažovať o tejto zmene v súvislosti s AR [4].

ΔAR vypočítame z vzťahu:

$$\Delta AR = \left(\frac{C_L^2}{\pi \times AR \times e \times \Delta C_{Di} + C_L^2} - 1 \right) AR \quad (10)$$

Účelom tejto úpravy je aplikovať ju na lietadlo prevádzkované pri určitom požadovanom C_L , aby sa uvažovaný štýl krídla mohol porovnať so základným krídlom. Z tohto dôvodu môžeme

špecifikovať dve nasledujúce podmienky pri určitom danom koeficiente vztlaku C_L [4]:

Základné krídlo:

$$(C_{Di})_1 = \frac{C_L^2}{\pi \times AR \times e} \quad (11)$$

Modifikované krídlo:

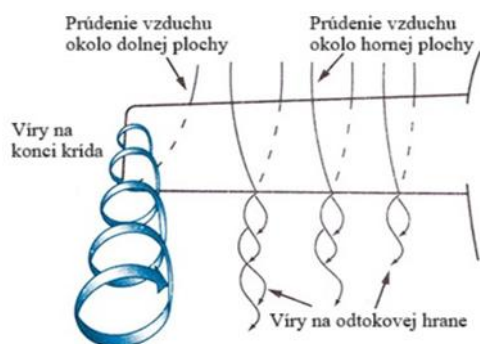
$$(C_{Di})_2 = \frac{C_L^2}{\pi \times (AR + \Delta AR) \times e} \quad (12)$$

Z toho vyplýva, že rozdiel v odpore indukovaným vztlakom je daný vzťahom [4]:

$$\begin{aligned} \Delta C_{Di} &= (C_{Di})_2 - (C_{Di})_1 = \frac{C_L^2}{\pi \times (AR + \Delta AR) \times e} - \frac{C_L^2}{\pi \times AR \times e} = \\ &= \frac{C_L^2}{\pi \times e} \left(\frac{1}{AR + \Delta AR} - \frac{1}{AR} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

2.5. Vírové prúdenie

Pri obtekaní lietadla vzduchom vznikajú na jeho krídlach podtlakové a pretlakové zóny. Rozdiel tlakov medzi týmito zónami vytvára tlakový gradient. Ak je krídlo obtekané prúdom vzduchu, pod kladným uhlom nábehu, vzniká nad jeho hornou časťou podtlak a na dolnej časti naopak pretlak. Vzniknutý tlakový gradient vytvára pozdĺžne prúdenie vzduchu na krídle, ktoré sa kombinuje s priečnym prúdením vzduchu. Pozdĺžne prúdenie vzduchu na konci krídla sa pokúša prechádzať zo spodnej strany krídla na vrchnú z dôvodu prítomného tlakového gradientu. Samotné krídlo predstavuje pre tento pohyb prekážku a odkláňa ho v smere rozpätia. Týmto je vytvárané charakteristické pozdĺžne prúdenie na krídle. Veľký tlakový rozdiel medzi tlakom v krídle a nasávaním zrýchľuje prúdenie vzduchu okolo konca krídla. Výsledkom sú turbulentné vzduchové víry na koncoch krídla (Obrázok 1). Vzduchové víry sa podieľajú na vzniku indukovaného odporu. Tento typ odporu je pre lietadlo nežiaduci, pretože znižuje efektívnosť letu a zvyšuje spotrebu paliva [3].



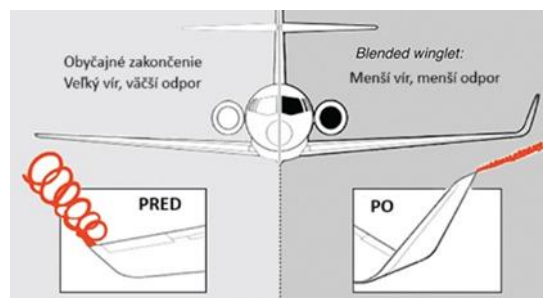
Obrázok 1 Vírové prúdenie okolo krídla Zdroj: webthesis.biblio.polito.it

2.5.1. Vplyv zakončenia krídla na vírové prúdenie

Mnohí inžinieri skúmali rôzne typy úprav zakončenia krídla s cieľom ovplyvniť a redukovať vírové prúdenie. Tieto úpravy detailnejšie rozoberám v kapitole 3. Použitím týchto zakončení sa zväčšuje efektívne rozpätie krídla bez toho, aby sa krídla predĺžili. Efekt vedie k zvýšeniu vztlaku a zníženiu indukovaného odporu, ale na úkor zvýšenia tvarového odporu a hmotnosti lietadla. Preto, ak zakončenie nie je dobre optimalizované,

zvýšenie tvarového odporu a hmotnosti by mohlo zrušiť akékoľvek možné zlepšenie aerodynamickej jemnosti krídla [5].

Úpravy krídel známe ako winglety predstavujú vertikálne alebo šikmé rozšírenia na ich koncoch, ktoré slúžia na odvádzanie vírov vznikajúcich na povrchu krídla generujúceho vztlak. Ich cieľom je zvýšiť aerodynamickú jemnosť krídla bez výrazného zväčšenia rozpätia tým, že znižujú odpor indukovaný vztlakom (viď obrázok 2). Winglety sťahujú prúdenie vzduchu z dolnej strany krídla na jeho hornú časť, čím zmierňujú intenzitu koncových vírov. Tento efekt vedie k redukcii indukovaného odporu a zlepšeniu aerodynamickej jemnosti krídla [6].



Obrázok 2 Rozdiel v tvorbe vírového prúdenia za použitia wingletu Zdroj: [6]

2.6. Štíhlosť krídla

Keďže mnohé prvé krídla mali obdĺžnikový tvar, štíhlosť krídla bola pôvodne definovaná ako jednoduché rozpätie delené tetivou, v prípade kužeľového krídla je definovaný ako rozpätie delené plochou krídla [1].

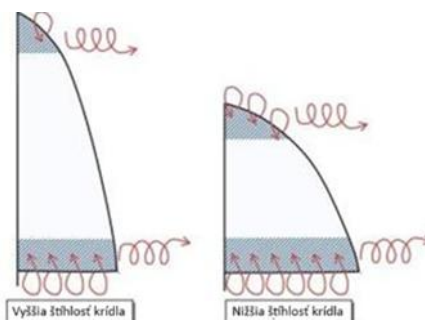
Štíhlosť krídla označujeme ju AR a je daný vzťahom:

$$AR = \frac{\text{rozpätie}}{\text{tetiva}} = \frac{b}{c} \quad (14)$$

Ak sa horná aj dolná časť tohto výrazu vynásobí rozpätím krídla, vznikne tvar, ktorý je často výhodnejší [11]:

$$AR = \frac{b^2}{bc} = \frac{(\text{rozpätie})^2}{\text{plocha}} \quad (15)$$

Plocha alebo časť krídla ovplyvnená vírmi je v prípade krídla s vysokou štíhlosťou menšia, a teda krídlo s vysokou štíhlosťou nemá veľkú stratu (obrázok 3) [7]. Ďalším účinkom zmeny štíhlosti krídla je zmena uhla odtrhnutia prúdenia. V dôsledku zníženia efektívneho uhla nábehu na špičke, krídlo s nižšou štíhlosťou sa bude odtrhávať pri vyššom uhle nábehu ako krídlo s vysokou štíhlosťou [7].



Obrázok 3 Porovnanie rozdielu prúdenia u krídel rôznych štíhlostí Zdroj: [7]

3. Typy zakončení krídel a ich vplyv na vlastnosti krídla

Vzhľadom na rastúci dôraz na optimalizáciu výkonu lietadla a znižovanie environmentálneho dopadu je nevyhnutné preskúmať, ako rôzne riešenia zakončení krídel ovplyvňujú prúdenie vzduchu a aerodynamické vlastnosti krídla. Predstavíme si tu niekoľko najbežnejších zakončení krídel a budeme sa zaoberať predovšetkým aký majú vplyv na vlastnosti krídla a ich aerodynamickú jemnosť. Pozrieme sa preto ako každé zakončenie prináša výhody a obmedzenia. Určíme rozdelenie zakončení krídel podľa ich mechanizácie na:

- Fixné zakončenia krídel
- Zakončenia krídel meniteľného tvaru
- Aktívne zakončenia krídel

3.1. Fixné zakončenia

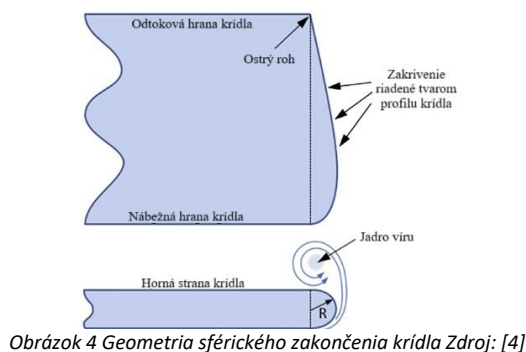
Fixné zakončenia krídel dosahujú požadované účinky prostredníctvom pevne nastavených konštrukčných riešení bez potreby dodatočného zásahu.

3.1.1. Okrúhle zakončenie krídla

Okrúhla špička krídla je jedným z najstarších a najjednoduchších spôsobov zakončenia krídla. Geometria tohto typu zakončenia je charakteristická polkruhovitou hranou, ktorá plynulo prechádza od nábežnej po odtokovú hranu krídla. Pri takejto geometrii má vír, ktorý vzniká na konci krídla, tendenciu presúvať sa smerom k hornej ploche krídla. Dôsledkom toho dochádza k zníženiu efektívnej štihlosti krídla ΔAR , čo je potrebné zohľadniť pri analýzach odporu, stability a riadenia lietadla. V praxi sa odporúča znížiť hodnotu ΔAR až o 0,20, aby analýzy zodpovedali reálnemu správaniu krídla s okrúhlymi špičkami. Pre zvýšenie aerodynamickej jemnosti treba upraviť $\Delta AR = -0,19$ [4].

3.1.2. Sféricke zakončenie krídla

Sférická špička je jednoduché a bežne používané zakončenie krídla na špičke. Geometria zakrivenia tohto typu špičky zvyčajne kopíruje profil krídla, pričom jej tvar je tvorený polkruhom pozdĺž osi špičky ako je znázornené na obrázku 4. Z hľadiska aerodynamiky je sférická špička považovaná za neefektívny tvar. Spôsobuje, že vír na špičke krídla sa stáča nahor a dovnútra. Takéto správanie víru, vedie k zmenšeniu vzdialenosti medzi dvoma vírmi na konci krídla. Dôsledkom je zníženie efektívnej štihlosti krídla ΔAR a zvýšenie odporu indukovaného vztlakom. Toto zníženie efektívnej štihlosti ΔAR prejavuje ako $\Delta AR = -0,18$ [4].



Obrázok 4 Geometria sférického zakončenia krídla Zdroj: [4]

3.1.3. Skosené zakončenie krídla

Skosený koniec krídla predstavuje konštrukčne najjednoduchšie riešenie geometrie zakončenia krídla v letectve. Jeho charakteristickou vlastnosťou je ostré zakončenie, ktoré zásadne ovplyvňuje formovanie škodlivých vírov. Pri skosenom zakončení sa vír formuje a prevažne zdržiava na vonkajšej strane konca krídla. Tým sa vír na špičke krídla účinne vzdalujú od osi lietadla. V dôsledku tohto javu dochádza k miernemu zvýšeniu efektívnej štihlosti krídla, hoci toto zlepšenie je kvantitatívne veľmi malé, s hodnotou prírastku ΔAR približne len +0,004 [4].

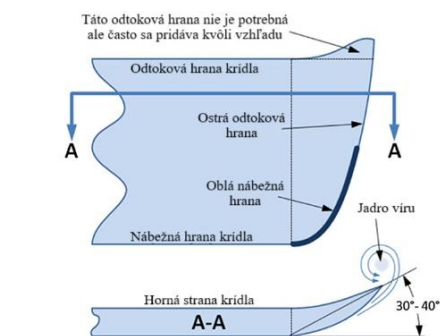
Významnou charakteristikou skoseného konca krídla je skutočnosť, že táto geometria nemá žiadny vplyv na účinok vzopätia, čo môže byť dôležitým faktorom pri návrhu krídla z hľadiska priečnej stability lietadla [4].

Zakrivené zakončenie krídla

Zakrivené zakončenie krídla predstavuje konštrukčné riešenie, ktoré sa vyznačuje výrazným zakrivením odtokovej hrany. Toto zakrivenie sa realizuje v dvoch základných formách: zdvihnutá špička (upturned) a sklonená špička (downturned). Primárnym cieľom oboch týchto konfigurácií je posunúť vír, ktoré sa tvoria na koncoch krídla, smerom von. Tým sa má dosiahnuť zvýšenie efektívnej štihlosti krídla ΔAR a následné zníženie indukovaného odporu [4].

- Zdvihnutá špička

Zdvihnutá špička krídla je charakteristická geometriou, pri ktorej sa dolná a horná plocha krídla zbiehajú do ostrého ukončenia alebo hrany, ktorá sa na odtokovej hrane rozširuje smerom nahor (viď obrázok 5). Teoreticky by táto konfigurácia mala prispievať k zvýšeniu separácie vírov na konci krídla, čo by malo viesť k zvýšeniu efektívneho ΔAR . V praxi je však toto zvýšenie pravdepodobne zanedbateľné a ťažko merateľné. Okrem toho, zdvihnutá špička krídla má tendenciu zvyšovať účinok vzopätia len o veľmi malú hodnotu. Pre výšenie aerodynamickej jemnosti teda netreba upravovať ΔAR [4].



Obrázok 5 Geometria zakriveného zakončenia krídla Zdroj: [4]

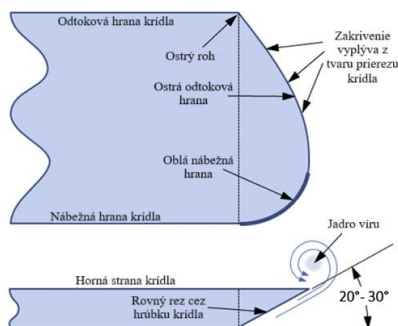
- Sklonená špička

Sklonená špička krídla predstavuje inverznú geometriu k zdvihnutej špičke. Podobne ako pri zdvihnutej špičke pre výšenie aerodynamickej jemnosti teda netreba upravovať ΔAR [4].

3.1.4. Hoernerove zakončenie krídla

Základným princípom tohto dizajnu je posunúť vír na konci krídla smerom von. To sa dosahuje pomocou ostrej hrany, ktorá oddeľuje hornú a dolnú plochu pozdĺž zadnej odtokovej hrany

krídla. Prvá časť nábežnej hrany tohto zakončenia má zvyčajne zaoblenú geometriu, ktorá zabraňuje zastaveniu prúdenia na hornej ploche krídla pri nízkych uhloch nábehu (Obrázok 6). Z aerodynamického hľadiska je prínos tohto riešenia neutrálny, čo sa prejavuje hodnotou $\Delta AR = 0,00$ [4].



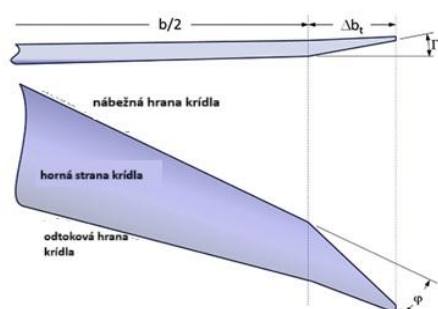
Obrázok 6 Geometria Hoernerovho zakončenia krídla Zdroj: [4]

Hlavná výhoda Hoernerovho zakončenia spočíva v jeho neutrálnom vplyve na efektívnu štiplosť krídla, čím sa odlišuje od okrúhleho zakončenia krídla, ktorý má na efektívnu štiplosť negatívny vplyv. Okrem toho, Hoernerov koniec krídla prispieva k zvýšeniu účinku vzopätia, čo má priaznivý vplyv na priečnu stabilitu lietadla [4].

3.1.5. Zalomené zakončenie krídla

Predĺžené a mierne zalomené zakončenie krídla predstavuje efektívne riešenie na zvýšenie efektívnej štiplosti krídla. Cieľom tohto riešenia je optimalizovať rozloženie zaťaženia pozdĺž rozpätia krídla, čo vedie k zníženiu indukovaného odporu. Táto úprava nezvyšuje škodlivý interferenčný odpor, hoci môže mierne zvýšiť trenie povrchu, ak je pridaná k existujúcemu krídlu [4].

Toto zakončenie krídla umožňuje zväčšiť rozpätie a štiplosť krídla pri relatívne malom zväčšení obtekanej plochy. Pridaním tohto predĺženia a vhodnou zmenou sklonu je možné prispôsobiť rozloženie vztaku pozdĺž rozpätia krídla tak, aby sa čo najviac priblížilo eliptickému tvaru a vytváralo čo najmenší indukovaný odpor a zároveň minimalizoval straty spôsobené trecím odporom [8].



Obrázok 7 Geometria zalomeného zakončenia Zdroj: [4]

Aerodynamická jemnosť zalomeného zakončenia závisí od uhla sklonu ϕ , ako aj od uhla vzopätia Γ a rozpätia Δbt (Obrázok 7). Uhol vzopätia sa pohybuje v rozmedzí 4-8°, v závislosti od geometrie krídla. Príliš vysoký alebo nízky uhol vzopätia, v rozpätí $\pm 10^\circ$ a viac, môže v skutočnosti zvýšiť odpor indukovaný vztakom [4].

3.1.6. Vertikálna plocha na konci krídla

Vertikálna koncová plocha má podobný efekt ako umiestnenie časti krídla medzi dvoma stenami v aerodynamickom tuneli. To spôsobuje, že sa krídlo správa viac ako dvojrozmerné teleso. Dôsledkom je zvýšenie koeficientov vztaku profilu, zväčšenie krivky vztaku a dosiahnutie vyššieho maximálneho koeficientu vztaku. Zároveň dochádza k zníženiu odporu indukovaného vztakom [9].

Použitie vertikálnych plôch však so sebou prináša aj určité nevýhody. Prvým problémom je zvýšenie škodlivého odporu v dôsledku zväčšenia obtekanej plochy a interferenčného odporu v mieste spojenia vertikálnej plochy s nosnou plochou. Druhým problémom je, že koncové plochy zvyšujú hmotnosť a znižujú prirodzenú frekvenciu nosnej plochy, čo ju robí náchylnejšou na chvenie. Na vyriešenie tohto problému je potrebné nosnú plochu čo najviac vystužiť, čo opäť vedie k zvýšeniu hmotnosti [4].

Vertikálne plochy na konci krídla sa používajú v rodine dopravných lietadiel Airbus 320, no v súčasnosti je tento štýl známy ako Wingtip Fence. Aerodynamická jemnosť vertikálnych plôch je závislá najmä od ich výšky a tvaru [4].

Zvýšenie aerodynamickej jemnosti je možné odhadnúť pomocou vzorca č.16 pre h/b do 0,4. [4]

$$\Delta AR \approx 1.9 \left(\frac{h}{b} \right) AR \quad (16)$$

Kde: h je výška wingletu, b je rozpätie krídla

3.1.7. Winglety

Winglet predstavuje sofistikovanú variantu vertikálnej plochy na konci krídla, ktorej hlavným cieľom je optimalizovať prúdenie vzduchu na okraji krídla. Jeden z najdôležitejších rozdielov medzi základným krídlom a krídlom s wingletom je v druhu odporu. Inštaláciou wingletov sa upraví rozloženie aerodynamických síl na krídle, čo vedie k zníženiu indukovaného odporu za predpokladu, že sú navrhnuté s primeraným uhlom natočenia a veľkosťou. Zároveň však dochádza k nárastu trecieho odporu a interferenčného odporu v mieste prechodu medzi krídlom a wingletom. V skutočnosti teda môžu ľahko zvýšiť celkový odpor [4].

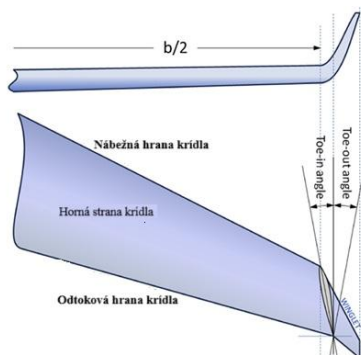
Dôležité geometrické parametre wingletu (Obrázok 8):

- **Cant angle** – uhol sklonu nábežnej hrany wingletu vzhľadom na zvislú rovinu
- **Sweep (toe) angle** – odchýlenie wingletu smerom dopredu alebo dozadu od smeru letu
- **Toe in/out angle** – uhol natočenia v rovine krídla, ktorý určuje, či je winglet zatlačený dovnútra, či vytlačený von

Funkcia wingletu je viazaná na správne využitie indukovaného vírivého prúdenia generovaného prúdením okolo krídla, takže winglet môže byť umiestnený nad krídlom, pod krídlom alebo v oboch pozíciách. Z aerodynamického pohľadu sú efektívne len vtedy, keď zníženie indukovaného odporu prevyšuje nárast odporu spôsobeného povrchovým trením a interferenciou [4].

Výsledné rozloženie vztaku krídla s wingletom sa podobá rozloženiu vztaku krídla s väčšou štiplosťou. To v skutočnosti znižuje koeficient indukovaného odporu pri rovnakom C_L . Tento

pohľad vysvetľuje, prečo musí byť winglet „zaťažený“, aby fungoval. „Zaťažený“ jednoducho znamená, že musí byť umiestnený v dostatočne veľkom relatívnom uhle nábehu, aby vytváral vztlak a tým zvyšoval oblasť nízkeho tlaku v blízkosti konca krídla. Nezaťažený winglet nezniží odpor indukovaný vztlakom, pretože jeho príspevok k poľu nízkeho tlaku je zanedbateľný [4].

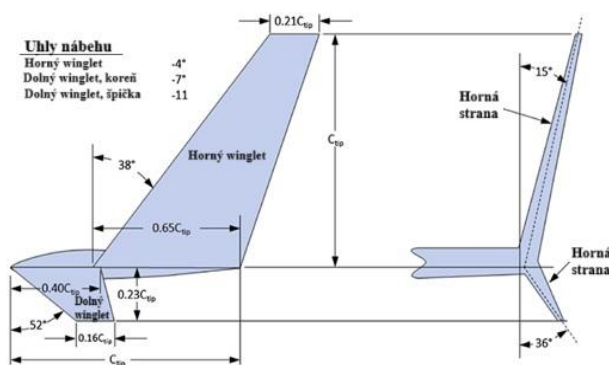


Obrázok 8 Geometria krídla s wingletom Zdroj: [4]

Prírastok jemnosti možno odhadnúť pomocou vzorca č.16, pričom sa predpokladá, že krídlo sa podobá koncovkej doske. Prírastok v štihlosti krídla by sa mal byť do +1,5. Vyšší prírastok je veľmi nepravdepodobný [4].

3.1.8. Whitcomb winglet

Vývoj Whitcombových wingletov, je úzko spojený s menom Richarda T. Whitcomba. Koncom 70. rokov Whitcomb vyvinul winglet špeciálne pre tankovacie lietadlo Boeing KC-135 (viď obrázok 9). Realizoval rozsiahly výskum, ktorého výsledky tejto práce boli publikované v roku 1976 v správe NASA [10]. Výskum prostredníctvom série testov preukázal, že aplikácia wingletov zvýšila dolet lietadla až o 7% na základe zníženia indukovaného odporu o 20% a zlepšenie aerodynamickej jemnosti C_L/C_D o 9% [6]. Tento úspech podnietil mnohých výrobcov lietadiel k implementácii wingletov do svojich návrhov.



Obrázok 9 Geometria Whitcomb wingletu Zdroj: [4]

V 80. rokoch boli vykonané letové skúšky Whitcombových wingletov na komerčnom lietadle McDonnell-Douglas DC-10. Výsledky ukázali, že najefektívnejšia konfigurácia pozostávala z kombinácie mierneho sklonu wingletov so zníženým rozpätím. Táto kombinácia viedla k zníženiu spotreby paliva v cestovnom režime o 3%, zvýšeniu doletu o 2% a zníženiu vzletovej vzdialenosti o 5% pri maximálnej vzletovej hmotnosti [11].

3.1.9. Blended winglet

Blended winglet (winglet s jemným prechodom) predstavuje evolúciu oproti Whitcombovmu wingletu, pričom hlavný rozdiel spočíva v absencii spodného wingletu. Ďalším charakteristickým znakom blended wingletu je rozsiahly a plynulý oblúk, ktorý spája krídlo a winglet. Táto konštrukcia umožňuje hladký prechod medzi krídlom a wingletom, čím nahrádza ostrý prechod prítomný pri Whitcombovom winglete. Toto riešenie má za cieľ znížiť tlakové maximum, a tým aj lokálne rýchlosti prúdenia vzduchu. Udržiavanie týchto parametrov na nízkej úrovni je kľúčové pre zabránenie separácii prúdenia v dôsledku nízkotlakových maxim a vzniku rázovej vlny pri vysokých Machových číslach [4].

Blended winglet s vysokou štihlosťou môže byť až o 60% účinnejší ako konvenčný winglet. Najdôležitejším parametrom pri návrhu blended wingletu je pomer výšky wingletu k rozpätiu krídla. Okrem zlepšenia aerodynamickej jemnosti, blended winglety zvyšujú pozdĺžnu a smerovú stabilitu lietadla, čím zabezpečujú lepšiu ovládateľnosť v turbulentných podmienkach [8].

3.2. Zakončenia krídla meniteľného tvaru

Zakončenia krídla meniteľného tvaru predstavujú technológiu, ktoré pomocou mechanizácie dokáže meniť sklon časti konca krídla.

3.2.1. Sklopné zakončenie

Lassen so svojím tímom v roku 2014 vypracovali európsky patent, v ktorom navrhli skladací koniec krídla na zlepšenie riadenia letu [12]. Takéto mechanické riešenie zakončenia (Obrázok 10) slúži ako prvok ovplyvňujúci štruktúru krídla a dynamiku koncových vírov. Možno však očakávať zvýšenie hmotnosti krídla v dôsledku dlhšieho krídla, skladacieho mechanizmu a predovšetkým zosilnenia existujúceho krídla, aby odolalo vyšším zaťaženiam spôsobeným väčším rozpätím [13].



Obrázok 10 Sklopné zakončenie Boeingu 777X Zdroj: Dan Neville

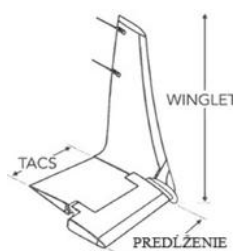
Aktuálne sklopná funkcia krídla slúži primárne na dodržanie obmedzení letiskových brán, ktoré obmedzujú maximálne rozpätie krídla, ktoré môže lietadlo mať. To zároveň umožňuje výrobcovi pri vývoji zväčšiť dĺžku a štihlosť krídla lietadla a dodržať stanovené obmedzenia [14]. V praxi by sa mohlo toto zakončenie použiť aj za letu s cieľom maximalizovať aerodynamickú jemnosť.

3.3. Aktívne zakončenie krídla

Aktívne riešenia zakončenia krídiel predstavujú technológie, ktoré dynamicky reagujú na meniace sa letové podmienky.

3.3.1. ATLAS – Aktívne zakončenie so systémom zmierňovania zaťaženia

Ide o konštrukčné riešenie konca krídla, ktoré kombinuje winglet s pomocnou vyvažovacou nosnou plochou zabudovanej v odtokovej hrane konca krídla. Toto zakončenie vykazuje pozoruhodnú schopnosť autonómne upravovať zaťaženie krídla počas zaťaženia. Toto aktívne zakončenie, ako je znázornené na obrázku 11, využíva snímače zaťaženia a pomocou vyvažovacej plochy, dokáže systém automaticky regulovať zaťaženie krídla počas letu [15].



Obrázok 11 Zloženie zakončenia ATLAS Zdroj: [15]

Aktívne zakončenie ATLAS pozostáva z troch hlavných častí (Obrázok 11):

- Predĺženie krídla
- TACS – vyvažovacia plocha na zníženie zaťaženia
- Samotný winglet

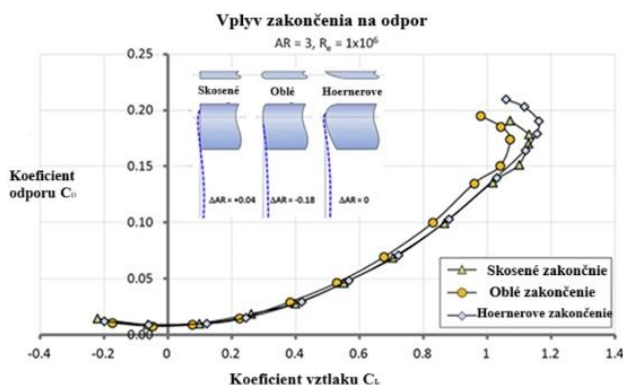
4. Návrh potenciálneho využitia zakončení krídla v civilnom letectve

V tejto časti sa práca sa zameria na porovnanie aerodynamických vlastností skúmaných zakončení a možné uplatnenie fixných, meniteľných a aktívnych typov zakončení krídiel, ktoré by mohli priniesť ďalší pokrok v budúcich koncepciách lietadiel.

4.1. Porovnanie skúmaných zakončení

Aby sme vedeli porovnať aerodynamické prínosy vlastností jednotlivých zakončení, musíme ich porovnať so základným krídlom ako referenciou. Skosené zakončenie krídla predstavuje konštrukčne najjednoduchšie riešenie geometrie ukončenia krídla v letectve, a preto nám vo väčšine prípadov slúži ako referenčné krídlo pre porovnanie.

Na obrázku 12 je znázornený graf, ktorý porovnáva aerodynamickú jemnosť troch typov zakončení, a to skosené, zaoblené a Hoernerove zakončenie špičky krídla.



Obrázok 13 Vplyv konfigurácie Whitcomb wingletu na celkový odpor Zdroj: [4]

Z grafu možno vyčítať, že najefektívnejším tvarom z týchto troch typov je práve Hoernerove zakončenie. Možno teda usúdiť, že Hoernerove zakončenie funguje dobre počas vzletu a pristátia, kde krídlo lietadla produkuje vyššie koeficienty vztlaku. Bolo zaznamenaných aj niekoľko ďalších výhod, ako je zvýšenie cestovnej rýchlosti a zvýšenie celkovej stability lietadla [16]. Čo sa týka porovnania zaobleného a skoseného zakončenia, z obrázku 12 možno usúdiť, že zaoblené zakončenie spôsobuje najväčší odpor vzduchu, čo prináša merateľné zníženie rýchlosti stúpania a aerodynamickej jemnosti. Skosené zakončenie pôsobí ako taký kompromis medzi tými dvoma typmi.

V prípade sférického a okrúhleho zakončenia, ich stručné porovnanie spomíname v kapitole 3.1.1. Okrúhle zakončenie býva aerodynamicky jemnejšie ako štvorcové alebo sférické. Tento predpoklad vychádza zo zvýšených koeficientov vztlaku v oblasti rýchlo sa zužujúcej špičky, čo pri typických cestovných uhloch nábehu môže viesť k vyššej jemnosti [4].

Pri zakrivených zakončeníach je primárnym cieľom posunúť víru na koncoch krídla smerom von. Tým sa má dosiahnuť zvýšenie efektívnej štihlosti krídla a následné zníženie indukovaného odporu. Je však potrebné podotknúť, že doposiaľ sa nepodarilo nájsť žiadne publikované vedecké štúdie alebo dokumenty, ktoré by potvrdzovali zlepšenie aerodynamickej jemnosti [4].

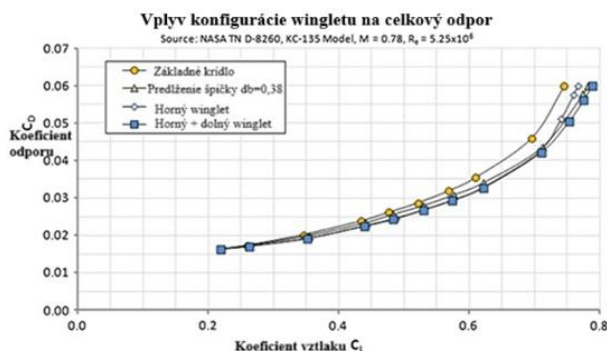
Z týchto informácií vieme približne určiť, že všeobecne najefektívnejšou jednoduchou úpravou tvaru špičky krídla je práve Hoernerove zakončenie. Toto tvrdenie potvrdil aj sám Hoerner vo svojom výskume [17]. Hoernerove zakončenie však nie je bez nevýhod. Aerodynamická jemnosť zakončenia sa pri vysokých rýchlostiach zhoršuje v dôsledku prelievania víru na vztlakovú plochu [18]. Zakončenie je preto vhodnejšie pre malé lietadlá. Avšak pre efektívne využitie každej z týchto úprav špičky je potrebné zhodnotiť pre aký druh prevádzky bude lietadlo využívané. Tento faktor môže výrazne ovplyvniť aerodynamické prínosy daného typu.

Vynájdenie wingletov sa ukázalo byť prelomovým úspechom, ktorý posunul aerodynamickú jemnosť krídla na novú úroveň. Aby winglet účinne fungoval, je potrebné zohľadniť v akom rozsahu CL sa lietadlo pohybuje pri cestovnej rýchlosti [4].

Pri aerodynamickej jemnosti daného wingletu je dôležitý aj tvar daného prevedenia. Toto tvrdenie preukázal Whitcomb pri vývoji svojho konceptu wingletu, kde skúmal rôzne typy konfigurácií a ich aerodynamickú jemnosť. Výskum [10] sa zaoberal porovnaním vztlaku, odporu a klopného momentu modelu lietadla KC-135 v aerodynamickom tuneli s tromi rôznymi konfiguráciami zakončenia krídla: predĺženie špičky krídla o 38% výšky horného wingletu, samotný horný winglet a kombinácia horného a dolného wingletu. Grafické znázornenie výsledkov pre odpor vzduchu je uvedené na obrázku 13. Z týchto výsledkov vyplýva, že winglet generuje menší odpor ako jednoduché predĺženie konca krídla. Zároveň sa ukázalo, že zníženie odporu dosiahnuté kombináciou horného a dolného wingletu nie je výrazne lepšie ako zníženie odporu dosiahnuté iba s horným wingletom [10].

Na porovnanie efektívnosti ďalších wingletov boli použité výsledky z výskumu Maksouda [19]. Cieľom tohto výskumu bolo

zistiť, ako tvar zakončenia krídla ovplyvňuje indukovaný odpor. Testovali sa tieto typy zakončení krídel: Blended winglet, Zalomené zakončenie, Vertikálna plocha na konci krídla v prevedení Wingtip Fence [19]. Tento výskum sme si vybrali z dôvodu jeho komplexného pohľadu na daný problém a



porovnanie vhodných typov zakončení pre túto prácu. Vo výskume sa skúmali dané typy v porovnaní so základným krídlom so skoseným zakončením pomocou CFD simulácií.

Obrázok 13 Vplyv konfigurácie Whitcomb wingletu na celkový odpor
Zdroj: [4]

Väčšina lietadiel štartuje pri uhle nábehu približne 12° a letí pri uhle nábehu približne 4° až 6°. Preto sa analýza zamerala na uhly nábehu 0°, 4° a 12°. Zvýšenie C_L/C_D zvyšuje aerodynamické vlastnosti lietadla, a tým prispieva k úspore paliva [19].

V tabuľke 1 sú uvedené aerodynamické koeficienty konfigurácií koncov krídla pri uhle nábehu 0 stupňov.

Tabuľka 1 Aerodynamické koeficienty pri uhle nábehu 0 stupňov

Konfigurácia	C_L	C_D	C_L/C_D	% C_D	% C_L/C_D
Skosené zakončenie	0,0472	0,0124	3,82	-	-
Wingtip fence	0,0381	0,0128	2,96	-3,87	-22,35
Zalomené zakončenie	0,0433	0,0114	3,80	7,93	-0,40
Blended winglet	0,0379	0,0129	2,92	-4,71	-23,40

Zdroj: Vlastné spracovanie podľa [19]

Keďže víry na koncoch krídla sú pri uhle nábehu 0 stupňov slabé, ich vplyv na prúdenie je minimálny.

V tabuľke 2 sú uvedené aerodynamické koeficienty konfigurácií koncov krídel pri uhle nábehu 4 stupne.

Tabuľka 2 Aerodynamické koeficienty pri uhle nábehu 4 stupne

Konfigurácia	C_L	C_D	C_L/C_D	% C_D	% C_L/C_D
Skosené zakončenie	0,2280	0,0246	8,87	-	-
Wingtip fence	0,2257	0,0236	9,55	3,82	7,64
Zalomené zakončenie	0,2355	0,0245	9,60	0,21	8,24
Blended winglet	0,2218	0,0235	9,45	4,49	6,51

Zdroj: Vlastné spracovanie podľa [19]

Z tabuľky 2 vyplýva, že najväčšie zlepšenie aerodynamickej jemnosti C_L/C_D poskytuje zalomené zakončenie krídla (8,24%), za ktorým nasleduje wingtip fence (7,64%). Blended winglet je v porovnaní s ostatnými konfiguráciami najmenej účinný. Tieto výsledky naznačujú, že zalomené zakončenie môže byť vhodné pre lietadlá s dlhým doletom, keďže väčšina lietadiel letí okolo tohto uhla nábehu [19].

V tabuľke 3 sú uvedené aerodynamické koeficienty konfigurácií koncov krídel pri uhle nábehu 12 stupňov.

Tabuľka 3 Aerodynamické koeficienty pri uhle nábehu 12 stupňov

Konfigurácia	C_L	C_D	C_L/C_D	% C_D	% C_L/C_D
Skosené zakončenie	0,5660	0,1020	5,55	-	-
Wingtip fence	0,5693	0,0980	5,81	3,94	4,70
Zalomené zakončenie	0,5720	0,9880	5,79	3,09	4,29
Blended winglet	0,5712	0,0963	5,93	5,62	6,94

Zdroj: Vlastné spracovanie podľa [19]

Z tabuľky 3 vyplýva, že blended winglet má najvyššie zlepšenie aerodynamickej jemnosti C_L/C_D (6,94%) pri danom uhle nábehu, za ktorým nasleduje wingtip fence (4,70%). Z výsledkov môžeme usúdiť, že blended winglety sú vhodnejšie pre lietadlá s krátkym doletom, ktoré vyžadujú časté vzlety. Wingtip fence ponúka zlepšenie C_L/C_D o 4,70%. Preto je wingtip fence vhodný pre stredne dlhé trasy. Pri uhle nábehu 4 stupne bolo najúčinnejšie zalomené zakončenie krídla, no pri uhle nábehu 12 stupňov však zalomené zakončenie už nie je schopné znížiť intenzitu vytváraného víru a preto je najmenej účinné z porovnávaných konfigurácií [19].

Celkovo je teda možné zhodnotiť, že žiadny z fixných zakončených krídel nefunguje dobre za všetkých letových podmienok. Preto je zrejmé, že na dosiahnutie čo najlepšieho výkonu je potrebné, aby sa zakončenia krídla aktívne prispôbovali podľa toho aké sú letové podmienky počas cesty. Toto poznanie viedlo k vynájdeniu nových kategórií zakončení krídel, ktoré sme si zadefinovali ako meniteľné a aktívne zakončenia. Zakončenia týchto kategórií sú pomerne nové a preto neexistuje veľa návrhov, ktoré sa aktívne využívajú v letectve. To znamená že je aj ťažké overiť aerodynamické prínosy týchto riešení.

Medzi zakončenia meniteľného tvaru radíme sklopné zakončenia. Sklopné zakončenia sú pomerne novodobým riešením, ktoré ešte nenašli využitie v praxi. Preto je ťažké dohľadať výsledky, ktoré by mohli overiť aerodynamické prínosy tohto riešenia. Jediné prevedenie tohto typu, ktoré bolo použité na veľkom dopravnom lietadle, je sklopné zakončenie na lietadle Boeing 777X.

Keďže sklopné zakončenie funguje na princípe menenia uhla sklonu konca krídla, môžeme na približné overenie použiť výsledky z výskumu A. Beechooka [20], ktorý sa zaoberal analýzou wingletu s uhlami sklonu 0, 30, 45 a 60 stupňov pomocou CFD simulácií a testami v aerodynamickom tuneli. Výsledky ukázali, že pri nízkych uhloch nábehu, ideálne pri cestovnom uhle nábehu, winglety s uhlom sklonu 45 a 60 stupňov vykazovali lepšie aerodynamické vlastnosti z hľadiska koeficientov vztlaku a odporu. Winglety so sklonom 45 a 60 stupňov neposkytovali optimálny výkon pri vysokých uhloch nábehu. Preto zmena uhla sklonu wingletov v rôznych fázach letu môže zlepšiť aerodynamickú jemnosť krídla a optimalizovať výkon [20]. Keďže sklopné zakončenie ešte nebolo zavedené do normálnej praxe, nevieme porovnať výsledky s tohoto výskumu na reálnom príklade a preto ide iba o približné overenie.

Medzi aktívne zakončenia krídla radíme aktívne zakončenie so systémom zmierňovania zaťaženia (ATLAS). ATLAS je systém, ktorý kombinuje redukciu vírov wingletom, podobný na štýl blended, s odľahčením aerodynamického zaťaženia pomocou aktívnej vyvažovacej plochy. Žiaľ nepodarilo sa nám nájsť žiadnu relevantnú štúdiu, ktorá by skúmala aerodynamické vlastnosti tohto zakončenia. Keďže toto zakončenie využíva geometriu

wingletu podobnú blended, možno usúdiť že bude mať podobné aerodynamické vlastnosti ako práve spomínaný Blended winglet. Avšak vďaka kombinácii tohto zakončenia s pomocnou vyvažovacou plochou, ktorá aktívne znižuje zaťaženie, možno očakávať zlepšenie koeficientov vzlaku a odporu pri určitých fázach letu.

4.2. Potenciál meniteľných zakončení krídiel

Správnym návrhom tohto zakončenia krídla bude možné zvýšiť štihlosť krídla s malým, ak vôbec nejakým nárastom vnútorných zaťažení krídla, čo povedie k lepšej aerodynamickej jemnosti, alebo jednoducho znížiť zaťaženia, a tým aj hmotnosť existujúcich platforiem [21].

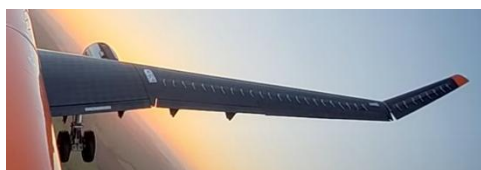
4.2.1. Projekt Boeing 777X

Boeing sa pred pár rokmi implementoval sklopné zakončenie na novom modeli 777X (Obrázok 10). Jeho plocha je vďaka tomuto systému oproti 787 približne o 10% väčšia, čím sa dosahuje vyšší vztlak a efektívnosť letu. Vďaka sklopným zakončeniam dosahuje lietadlo rozpätie približne 71 metrov, čo prispieva k zníženiu indukovaného odporu a tým aj k zlepšeniu palivovej úspornosti a celkovej výkonnosti stroja [14].

Pri takomto zakončení možno očakávať zvýšenie hmotnosti v dôsledku dlhšieho krídla, skladacieho mechanizmu a predovšetkým zosilnenia existujúceho krídla, aby odolalo vyšším ohybovým zaťaženiam od väčšieho rozpätia [14].

4.2.2. Projekt Airbus AlbatrossONE

V júli 2020, Airbus otestoval takzvané „polo-elastické“ sklopné konce krídla modelu AlbatrosONE. Ide o typ zakončenia, pri ktorom špička krídla môže byť uvoľnená ako reakcia na silný porыв alebo manéver, ale potom sa vráti do rovinatej polohy, aby sa pokračovalo v efektívnom lete (Obrázok 14). Tento potenciál ponúka možnosť znížiť zaťaženie krídla a zabrániť separácii prúdenia na konci krídla, čím sa zvyšuje celkový výkon lietadla [22].



Obrázok 14 Kridlo modelu AlbatrossONE Zdroj: youtube.com

Vedúci projektu polo-elastického zavesenia pre Airbus, Thomas Wilson, vo svojom výskume [21] zistil, že toto riešenie vedie k výraznému zmierneniu nárazových a manévrových zaťažení, čo môže potenciálne umožniť značnú úsporu hmotnosti alebo byť prostriedkom na maximalizáciu rozpätia krídla. Okrem toho sa ukázalo, že toto zavesenie zmierňuje tlmenie nakláňania a umožňuje lietadlu nakláňať sa rýchlejšie v porovnaní s lietadlom s skosenými koncami krídla [21].

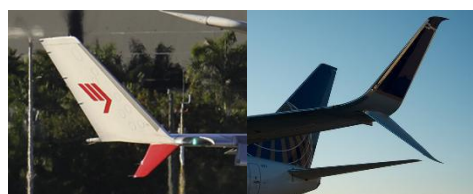
4.3. Potencionálne využitie mechanizácie zakončení krídiel

Keďže winglety sú fixné zakončenia prispôbené väčšinou tak, aby zlepšovali aerodynamické vlastnosti daného pevného krídla, ich mechanizácia by mohla potenciónálne zhoršiť ale aj zlepšiť

aerodynamickú efektívnosť daného zakončenia. Preto by bolo potrebné dobre zhodnotiť návrh wingletu, ktorý by bol vhodný na mechanizáciu a prinášal by benefity prevyšujúce nevýhody spojené s pridaním mechanizácie. Medzi nevýhody spojené s pridaním mechanizácie môžeme zahrnúť zvýšenie hmotnosti krídla z dôvodu pridanej váhy inštalovanej mechanizácie, zosilnenia konštrukcie krídla, zvýšenie ohybových momentov a zaťaženia pôsobiace na krídlo.

4.3.1. Teoretický koncept mechanizovaného zakončenia

Pre náš teoretický návrh mechanizovaného zakončenia sme sa inšpirovali dvomi súčasnými zakončeniami, ktorými sú Whitcomb a Split-scimitar winglet. Išlo by o mechanizovaný winglet, ktorý by využíval, podobne ako u dizajnu Whitcomb wingletu, hornú a dolnú plochu wingletu (viď obrázok 15).



Obrázok 15 Whitcomb a Split-Scimitar winglet Zdroj: Autor podľa [4], newatlas.com

Mechanizáciou jeho spodnej a hornej plochy wingletu by mohlo dôjsť k dynamickej úprave uhlu sklonu nábežnej hrany wingletu (Cant angle) počas letu. Toto riešenie by optimalizovalo sklon hornej a dolnej plochy wingletu v dôsledku reakcie na zmeny letových podmienok, čo by pomohlo k zlepšeniu redukcie vírového prúdenia. Pri optimálnom nastavení vie winglet efektívne rozptyľovať energiu vírov, čím znižuje ich intenzitu a aj indukovaný odpor, ktorý vzniká v dôsledku tvorby týchto vírov. Zároveň tým zvyšuje aj efektívny vztlak krídla.

Dôsledkom tohto riešenia by sa mohlo efektívne zväčšovať rozpätie a štihlosť krídla. Vyššia štihlosť krídla vedie k zníženiu indukovaného odporu, pretože znižuje intenzitu vírov na koncoch krídla. Uhol sklonu ovplyvňuje, ako veľmi winglet prispieva k tomuto zvýšeniu štihlosti. Optimálny uhol sklonu nám teda umožňuje maximalizovať efektívne rozpätie bez výrazného nárastu tretieho odporu.

Na čiastočné overenie prínosov návrhu sa môžu použiť výsledky z výskumu [20], ktorý sme taktiež už využili pri čiastočnom overovaní aerodynamických vlastností sklopného zakončenia. Spomínané výsledky zistili že zmena uhla sklonu wingletov v rôznych fázach letu môže zlepšiť aerodynamickú účinnosť lietadla a optimalizovať výkon [20].

Treba však zdôrazniť, že výsledky tohto výskumu nemusia byť plne aplikovateľné na náš návrh, keďže analyzovaný model obsahoval iba hornú časť wingletu a chýbala mu spodná plocha. Práve prítomnosť dolnej plochy v našom prípade môže viesť k odlišným aerodynamickým vlastnostiam, keďže ovplyvňuje rozloženie tlaku okolo krídla a spôsobuje ďalšie obtekanie, ktoré môže zvýšiť indukovaný aj interferenčný odpor.

Možno povedať, že koncept wingletov s meniteľným uhlom náklonu sa javí ako potenciónálne efektívna náhrada za klasické pevné winglety.

5. Zhodnotenie výsledkov práce

V tejto časti práce zhodnotíme dosiahnuté výsledky a zosumarizujeme kľúčové poznatky vyplývajúce z doterajších poznatkov. Zhodnotíme si využité skúmaných zakončení, ich prínosy a obmedzenia, a zároveň si načrtujeme potenciálne smery ich budúceho vývoja.

5.1. Zhodnotenie využitia zakončení krídiel

Hlavným cieľom úprav zakončení krídla nie je len zníženie indukovaného odporu. Úlohou konštruktéra je navrhnuť také riešenie, ktoré minimalizuje negatívne vplyvy a zároveň maximalizuje zlepšenie letových vlastností. Výkonové zlepšenia možno vždy porovnať s referenčným lietadlom vybaveným základným krídlom bez modifikácií.

Rôzne typy zakončení krídiel prinášajú rozdielne výhody v závislosti od prevádzkových podmienok, ako sú dĺžka letovej trasy (dlhé, stredné alebo krátke trasy), rýchlostné režimy, hmotnosť lietadla či špecifické využitie (napríklad akrobacia alebo rekreačné lietanie). Napríklad zalomené konce krídla sú najefektívnejšie pri dlhých trasách, kde dosahujú vysokú aerodynamickú jemnosť pri cestovnom uhle nábehu. Avšak pri vyšších uhloch nábehu, keď je intenzita vírov väčšia, ich schopnosť znižovať zostupný prúd výrazne klesá [19].

V posledných rokoch došlo k výraznému nárastu výskumu aktívnych a meniteľných zakončení krídla, ktoré využívajú adaptívne a meniteľné geometrické prvky s cieľom optimalizovať aerodynamické parametre podľa aktuálnych letových podmienok. Tieto systémy zvyšujú aerodynamickú jemnosť a ovplyvňujú bočnú a smerovú stabilitu lietadla. Medzi navrhnuté riešenia patria napríklad sklopné zakončenia a aktívne zakončenia vybavené systémom zmierňovania zaťaženia (ATLAS).

Pri hodnotení prínosov zakončení krídla nie je postačujúce zamerať sa iba na zníženie odporu vzduchu alebo zlepšenie aerodynamickej jemnosti počas vzletu. Dôležitým ukazovateľom zlepšenia výkonu je aj dosiahnutie najnižšej možnej spotreby paliva a zlepšenie maximálneho doletu, pričom je potrebné zohľadniť aj vplyv hmotnosti zakončení krídla spolu so znížením odporu.

Aj keď sa môže zdať nákladné investovať viac ako 600 000 USD za inštaláciu wingletov, ktoré šetria len niekoľko percent paliva, je dôležité pozrieť sa na túto otázku z dlhodobého hľadiska. Úspora paliva vo výške jedného percenta počas bežnej prevádzky môže znamenať zníženie spotreby až o 45 litrov za hodinu, čo za rok predstavuje desaťtisíce litrov paliva a státisíce eur ušetrených nákladov [6].

5.2. Porovnanie výhod a obmedzení zakončení krídiel

Štúdia Maksouda [19] ukázala, že zakončenia krídiel a wingletov dokážu účinne znížiť indukovaný odpor a zlepšiť aerodynamické vlastnosti, hoci rozdiely medzi nimi môžu byť výrazné alebo len minimálne. Ako už bolo často zdôraznené, každý druh zakončenia má odlišný spôsob fungovania a je efektívny pri rôznych dĺžkach letových trás. Výber optimálneho zakončenia krídla závisí od konkrétnych výkonnostných cieľov a konštrukčných parametrov daného lietadla.

Jednoduché úpravy zakončení krídiel, ako sú skosené, okrúhle, sférické, zakrivené alebo Hoernerove zakončenia, majú len malý vplyv na aerodynamickú efektívnosť. Ich schopnosť minimalizovať vírové prúdenie na koncoch krídiel a zvyšovať efektívnu štitlosť je relatívne malá, preto sa tieto riešenia najčastejšie využívajú u ľahkých lietadiel. Dôvodom je, že tieto lietadlá majú menšie rozpätie krídiel, a preto sú benefity týchto úprav znateľnejšie ako u veľkých dopravných lietadiel s väčším rozpätím krídiel.

Pridaním wingletov do krídla lietadla sa zvýši jeho štitlosť, ktorá je jedným z hlavných faktorov pre zníženie indukovaného odporu. Taktiež optimalizácia veľkosti wingletov by mohla zabrániť drastickému zvýšeniu trecieho odporu, čím by sa znížil celkový odpor na výhodnejšiu úroveň. Aerodynamické prínosy wingletov zvyčajne prevyšujú negatívne dôsledky spojené s ich dodatočnou hmotnosťou a zvýšeným odporom, čo je dôvod, prečo väčšina novodobých lietadiel už od výroby obsahuje winglety.

Výhody a obmedzenia wingletov, ktoré prispievajú k zlepšeniu výkonnosti, možno definovať takto:

- **Výhody:**
 - Indukovaný odpor sa znižuje pri vzlete a cestovnej rýchlosti
 - Nárazový odpor sa niekedy trochu zníži pri cestovnom režime v dôsledku zmeny rozpätia zaťaženia spôsobeného wingletom
 - Zvýšenie efektívnej štitlosti pri minimálnom zvážšení rozpätia krídla
 - Znížený hluk pri vzlete
 - Zníženie spotreby paliva
 - Zvýšenie doletu
 - Zníženie turbulencie v úplave
- **Obmedzenia**
 - Profilový odpor sa zvyšuje v dôsledku zvážšenia obtekanej plochy
 - Zníženie účinku vzopätia
 - Zvýšenie interferenčného odporu
 - Vyššie zaťaženia v dôsledku hmotnosti samotného wingletu
 - Zvýšenie hmotnosti existujúcej konštrukcie krídla v dôsledku zvýšenia statického zaťaženia a splnenia požiadaviek na chvenie a únavu
 - Zvýšené náklady (vývoj, udržateľnosť, inštalácia)
 - Posun pôsobiska vztlaku ku koncu krídla, čím sa zvyšujú ohybové momenty

Keďže každé zakončenie inak ovplyvňuje aerodynamické vlastnosti krídla, treba pri ich implementácii zhodnotiť rôzne faktory ako typ lietadla a druh jeho prevádzky, aby sa dosiahla najlepšia aerodynamická efektívnosť. Z toho dôvodu sa môžu dané výhody a obmedzenia líšiť.

5.3. Perspektíva vývoja do budúcnosti

Ako bolo uvedené v predchádzajúcich kapitolách, vývoj zakončení krídiel prešiel od jednoduchých riešení úprav špičky krídla ku wingletom až po sofistikovanejšie koncepty, ktoré dokážu aktívne znižovať zaťaženie alebo meniť svoj tvar.

Dá sa povedať, že fixné zakončenia krídla už za roky výskumu dosiahli potencionálny strop svojho rozvoja. Preto je veľmi

nepravdepodobné, že v najbližších rokoch by sa mohol objaviť nový prelomový koncept fixného zakončenia. Väčšia perspektíva rozvoja sa pripisuje práve meniteľným a aktívnym zakončeniam, ktoré dokážu meniť svoju geometriu a aktívne sa prispôbovať letovým podmienkam.

Sklopné zakončenia by umožnili meniť rozpätie krídla počas letu, optimalizujúc ho pre vzlet, celkový let a pristátie. Podobným smerom sa vybrali aj spoločnosti Boeing a Airbus, ktorých projekty sme si podrobnejšie rozobrali v kapitole 4.2.1 a 4.2.2. Aktívny typ zakončenia ako je ATLAS umožňuje aktívne znižovať zaťaženie krídla počas letu, čím by sa znížila hmotnosť konštrukcie a zvýšila aerodynamická efektívnosť. Všetky riešenia predstavujú zaujímavú myšlienku, ktorá môže byť v budúcnosti použitá pri vývoji nových podobných konceptov.

V práci je taktiež zhodnotený potenciál mechanizácie zakončení krídiel a teoretický návrh konceptu mechanizovaného wingletu, ktorý by mohol byť inšpiráciou pre budúci vývoj. Tento návrh je však hodnotený len na základe teoretických poznatkov uvedených v tejto práci a preto ho treba brať s určitou rezervou. V budúcnosti by sa preto mohol pomocou 3D softvérov vytvoriť model tohto konceptu, na ktorom by sa následne dali čiastočne overiť teoretické tvrdenia pomocou CFD simulácií.

Myslím si, že inžinieri sa v blízkej budúcnosti budú uberať práve smerom mechanizácie zakončení krídiel než optimalizáciou súčasných alebo návrhom nových fixných zakončení. Koncept mechanizácie zakončení krídiel je ešte stále pomerne nepreskúmaná oblasť s veľkým potenciálom, ktorá môže v budúcnosti priniesť zaujímavé riešenia. Avšak vývoj nových technológií napreduje v súčasnej dobe raketovým tempom, čo môže v blízkej dobe priniesť úplne nové koncepty s technológiou, ktorá doteraz nebola využitá. Perspektíva vývoja do budúcnosti je teda obrovská.

6. Záver

Práca sa zaoberala analýzou vplyvu tvaru zakončenia krídla na jeho aerodynamické vlastnosti, pričom sa zamerala na indukovaný odpor, efektívnu štihlosť a celkovú aerodynamickú jemnosť. Boli tu preskúmané rôzne typy zakončení krídla.

Teoretická časť práce poskytla prehľad o aerodynamických princípoch ovplyvňujúcich prúdenie vzduchu okolo krídla, s dôrazom na tvorbu vírového prúdenia na koncoch krídla a jeho negatívny vplyv na aerodynamickú efektívnosť. Analýza ukázala, že vhodná optimalizácia tvaru zakončenia krídla môže výrazne znížiť indukovaný odpor, zlepšiť efektívnu štihlosť a tým aj celkovú aerodynamickú jemnosť krídla.

Na základe analýzy konkrétnych typov zakončení krídla, od jednoduchých fixných zakončení až po pokročilé aktívne a mechanizované riešenia, práca poukázala na ich možné výhody a obmedzenia. Zistilo sa, že voľba optimálneho tvaru zakončenia krídla závisí najmä od konkrétnych požiadaviek na výkon, dolet, spotrebu paliva a riadenie lietadla. Práca tiež potvrdila, že aktívne a mechanizované zakončenia krídla majú potenciál pre ďalšie zlepšenie aerodynamickej jemnosti, najmä pri adaptácii na rôzne letové podmienky. V tejto oblasti existuje rozsiahly priestor a značný potenciál pre budúci výskum a zdokonaľovanie existujúcich aj úplne nových konceptov.

Záverom možno konštatovať, že práca poskytla komplexný prehľad o problematike vplyvu tvaru zakončenia krídla na aerodynamické vlastnosti lietadla. Dosiahnuté výsledky potvrdili význam tohto faktora pre zvýšenie efektivity a udržateľnosti leteckej dopravy.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

- [1] E. L. Houghton a P. W. Carpenter, Aerodynamics for Engineering Students, London: Butterworth-Heinemann, 2003.
- [2] V. Vykouk, AERODYNAMIKA A MECHANIKA LETU PRO PILOTA ZÁVĚSNÍCH KLUZÁKŮ, Praha: ústřední výbor Svazu pro spolupráci s armádou, 1981.
- [3] T. A. Talay, INTRODUCTION TO THE AERODYNAMICS OF FLIGHT, Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1975.
- [4] S. Gudmundsson, General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures, Waltham: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [5] D. McLean, „Wingtip Devices: What They Do and How They Do It,“ rev. Boeing flight safety conference 2005, 2005.
- [6] C. Bargsten, Winglets: Striving for Wingtip Efficiency, Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 2011.
- [7] S. Yadav, „ASPECT RATIO AND ITS EFFECT,“ Wordpress, 28 Január 2014. [Online]. Available: <https://surjeetyadav.wordpress.com/2014/01/28/aspect-ratio-and-its-effect/>. [Cit. 22 4 2024].
- [8] P. M. Sforza, Commercial Airplane Design Principles, Waltham: Butterworth-Heinemann, 2014.
- [9] D. R. Riley, WIND-TUNNEL INVESTIGATION AND ANALYSIS-OF THE EFFECTS OF END PLATES ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN UNSWEPT WING, Los Angeles: NATIONAL ADVISORY COMMITTEE FOR AERONAUTICS, 1951.
- [10] R. T. Whitcomb, „A design approach and selected wind-tunnel results at subsonic speeds for wing-tip mounted winglets,“ National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C, 1976.
- [11] A. B. Taylor, DC- 10 Winglet Flight Evaluation Summary Report, Long Beach: National Aeronautics and Space Administration, 1983.
- [12] M. A. Lassen, C. R. Douglas, K. T. Jones a T. B. Kenning, „Wing fold controller“. Európa Patent EP2727829A2, 7 Máj 2014.

- [13] E. Costa, „Aircraft with Folding Wingtips,“ 2017. [Online]. Available: www.icao.int/Meetings/GANIS-SANIS/Presentations/GANIS-2/Airport%20operational%20performance/2.2%20ICAO_GANIS-Airfield%20Design%20-%20Evanicio%20Costa.pdf. [Cit. 22 4 2024].
- [14] The Boeing Company, „Boeing 777X,“ Boeing, [Online]. Available: <https://www.boeing.com/commercial/777x/by-design>. [Cit. 22 4 2024].
- [15] Tamarack Aerospace Group, „ATLAS® Active Winglets for Cessna Citation M2,“ 2021. [Online]. Available: www.aas.ag/fileadmin/redaktion/media/Service/Modification/Tamarack/Tamarack_Active_Winglet_M2_Info_v3.0.pdf. [Cit. 22 4 2024].
- [16] D. Sakrison, „The story behind the Hoerner wingtip,“ texasaeroplastics.com, [Online]. Available: <https://texasaeroplastics.com/pages/the-story-behind-the-hoerner-wing-tip>. [Cit. 22 April 2025].
- [17] S. Hoerner, „Aerodynamic Shape of the Wing Tips,“ United States Air Force, Ohio, 1952.
- [18] A. Brocklehurst a G. Barakos, „A review of helicopter rotor blade tip shapes,“ Elsevier Ltd., Liverpool, 2012.
- [19] T. Maksoud a S. Seetloo, „WINGTIPS AND MULTIPLE WING TIPS EFFECTS ON WING PERFORMANCE: THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSES,“ rev. International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics , Orlando, 2014.
- [20] A. Beechook a J. Wang, „Aerodynamic Analysis of Variable Cant Angle Winglets for Improved Aircraft Performance,“ rev. International Conference on Automation & Computing, London, 2013.
- [21] T. Wilson, A. Castrichini, A. Azabal, J. E. Cooper, R. Ajaj a M. Herring¹, „Aeroelastic Behaviour of Hinged Wing Tips,“ rev. International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, Como, 2017.
- [22] Airbus, „Freely flapping wing-tips on future aircraft just took a leap forward,“ Airbus, 7 Október 2020. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-10-freely-flapping-wing-tips-on-future-aircraft-just-took-a-leap-forward>. [Cit. 22 4 2024].



KOMPARACE LETECKÉ LEGISLATIVY V OBLASTI LICENCOVÁNÍ LETECKÉHO PERSONÁLU V EU, USA A KANADĚ

Kristýna Kyjovská
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Alena Novák Sedláčková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article is focused on comparison and analysis of the aviation legislation governing the licensing of aviation personnel in the European Union, the United States of America, and Canada. The goal is to compare the differences in the legislative framework for aviation personnel licensing and the potential cross-border transfer and validation of licenses in between these regions. Furthermore, this work examines the implementation of international standards set by the International Civil Aviation Organization (ICAO) and the role of national and supranational organizations, including EASA, FAA, and Transport Canada. The European Union Aviation Safety Agency (EASA) oversees the standardization of legislation among EU member states. One of the many responsibilities of the Federal Aviation Administration (FAA) includes licensing aviation personnel in the United States of America. In Canada, matters of aviation legislative issues, including licensing of aviation personnel, are managed by Transport Canada Civil Aviation (TCCA). Despite the existence of a requirement for international unification of aviation personnel licensing, differences can be found between individual national legislations, and therefore, in the case of foreign license validation, fulfillment of specific requirements is necessary for their international transfer and recognition.

Keywords

aviation legislation, legislative unification, license conversion, licensing, legislative implementation

1. Úvod

S rozvojem letecké dopravy, jako klíčového odvětví moderního světa, vznikla potřeba jasně definovat letecký personál a stanovit podmínky příslušných kvalifikací. Pojem letecký personál zahrnuje všechny osoby podílející se na provozu, řízení a údržbě letadel. Patří mezi ně piloti, řidiči letového provozu, palubní průvodčí, technici údržby letadel a mnoho dalších, jejichž výčet můžeme nalézt v Předpisu L1 – O způsobilosti leteckého personálu civilního letectví z roku 2023. Pro každou z kategorií existují specifické tréninkové a kvalifikační požadavky. Vzhledem k rozsáhlosti této problematiky se tento článek zaměřuje specificky na legislativní rozdíly licencí dopravních pilotů.

Býti pilotem a disponovat licencí opravňující k řízení letadla je spojeno s určitými právními privilegii. Nejedná se tedy o základní právo ale o získané oprávnění, které je podmíněno splněním požadavků definovaných národními a nadnárodními předpisy. Toto oprávnění také může být regulováno nebo dokonce odebráno. Regulace licencování pilotů se proto stala nezbytnou součástí leteckého práva a bezpečnosti civilního letectví.

Postupně se ve světě vyvinuly různé regulační orgány, jako například Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví (EASA), Federální úřad pro letectví (FAA) a Transport Canada, které dnes hrají klíčovou roli v regulaci leteckého personálu na mezinárodní úrovni v Evropě, USA a Kanadě.

Vzhledem k tomu, že piloti a další letecký personál často pracují v mezinárodním prostředí, je důležité zkoumat nejen rozdíly mezi jednotlivými legislativními systémy, ale i možnosti konverze a uznávání licencí mezi státy. Cílem je poskytnout komplexní porovnání letecké legislativy v oblasti licencování leteckého personálu v EU, USA a Kanadě, rozdíly mezi

legislativními rámci EASA, FAA a Transport Canada budou přitom detailně analyzovány. Pozornost je zaměřena na zhodnocení současného stavu i možných směrů budoucího vývoje v kontextu globalizace a mezinárodní spolupráce v civilním letectví. Na základě této komparativní analýzy jsou navržena konkrétní opatření pro zefektivnění procesu vzájemného uznávání licencí mezi těmito jurisdikcemi při zachování vysokých bezpečnostních standardů.

2. Metodika a metody zkoumání

Text se věnuje srovnání přístupů k licencování leteckého personálu v rámci EU (EASA), USA (FAA) a Kanady (Transport Canada). S ohledem na širší tématu je pozornost soustředěna především na oblast průkazů způsobilosti dopravních pilotů (ATPL).

Analýza byla strukturována do tří hlavních fází. V první fázi byla provedena analýza základních mezinárodních standardů podle ICAO, především Annexu 1, který se týká způsobilosti leteckého personálu. V druhé fázi byla zpracována analýza požadavků jednotlivých legislativ. V rámci evropského prostoru byl vykonán rozbor Nařízení Komise (EU) č. 1178/2011, zejména jeho Přílohy I (Part-FCL). V rámci amerického regulačního systému byly prostudovány předpisy 14 CFR Chapter I, Subchapter D, zejména Part 61 – Subpart G, které vymezují požadavky FAA pro získání průkazu ATPL. V kanadském kontextu byly posouzeny předpisy Canadian Aviation Regulations (CARs) – Part IV, které upravují licencování leteckého personálu v Kanadě. Třetí fáze zahrnovala porovnání těchto požadavků s využitím komparativní metody. Byly srovnány klíčové požadavky, jako minimální věk žadatelů, specifické požadavky na zkušenosti jako velitel letadla, požadavky na navigační a noční lety, lety podle přístrojů,

možnosti využití leteckých simulátorů, teoretické znalosti a praktické zkoušky dovedností a další.

3. Výsledky

Ačkoliv národní legislativy v oblasti licencování leteckého personálu vycházejí z mezinárodních standardů ICAO, jejich konkrétní podoba se v jednotlivých jurisdikcích v mnoha ohledech liší.

Legislativní rámec Evropské unie (EASA)

V Evropské unii je hlavním právním nástrojem pro regulaci licencování leteckého personálu Nařízení Komise (EU) č. 1178/2011, známé jako "Part-FCL". Toto nařízení implementuje standardy ICAO Annex 1 do právního rámce EU. Poskytuje tak ucelený přehled požadavků pro členské státy EU. Letecké úřady jednotlivých států EU, jako ÚCL v České republice nebo Dopravný úřad na Slovensku, pak zajišťují implementaci těchto předpisů do národních nařízení a dohlíží na jejich dodržování.

Legislativní rámec USA (FAA)

Ve Spojených státech amerických hlavní dozor v oblasti letectví vykonává FAA. Určuje pravidla pro výcvik a osvědčování leteckého personálu podle 14. titulu Sbírký federálních předpisů (14 CFR), především v sekcích 61, 63, 65, 67 a 68. Americký systém se od mezinárodních standardů ICAO odchyľuje výrazněji než evropské předpisy. FAA je ale velmi transparentní a jakékoli odchylky od standardů ICAO uvádí na svých veřejně dostupných webových stránkách k nalezení pod názvem *GEN 1.7 Differences from ICAO Standards, Recommended Practices and Procedures*.

Legislativní rámec Kanady (TC)

V Kanadě reguluje licencování leteckého personálu Transport Canada prostřednictvím *Canadian Aviation Regulations* (CARs), přičemž zásadní je *Part IV – Personnel Licensing and Training*. U kanadského systému můžeme pozorovat kombinaci prvků jak evropského, tak amerického přístupu k licencování leteckého personálu, ačkoliv oproti FAA se mnohem více snaží korespondovat s ICAO.

Porovnání požadavků pro ATPL

Minimální věk

- **EASA:** 21 let
- **FAA:** 23 let (standardně), 21 let (pro absolventy akreditovaných leteckých univerzitních programů)
- **Transport Canada:** 21 let

Předpoklady

- **EASA:** Držitel MPL nebo CPL(A) s přístrojovou kvalifikací pro vícemotorové letouny + výcvik MCC
- **FAA:** Držitel CPL s přístrojovou kvalifikací, nebo vojenské zkušenosti splňující požadavky § 61.73, nebo zahraniční ATPL/CPL s IR vydaný smluvním státem ICAO

- **Transport Canada:** Držitel CPL(A) s přístrojovou kvalifikací a osvědčením zdravotní způsobilosti 1. třídy

Celková letecká zkušenost

- **EASA:** Minimálně 1 500 hodin v letounech
- **FAA:** Minimálně 1 500 hodin
- **Transport Canada:** Minimálně 1 500 hodin, z nichž minimálně 900 hodin v letounech

Požadavky na velitele letadla (PIC)

- **EASA:**
 - 500 hodin jako PICUS, nebo
 - 250 hodin jako PIC, nebo
 - 250 hodin (včetně alespoň 70 hodin jako PIC a zbytek jako PICUS)
- **FAA:** 250 hodin jako PIC nebo jako druhý pilot vykonávající povinnosti PIC pod dohledem
- **Transport Canada:** 250 hodin jako PIC v letounech, z toho max. 100 hodin může být jako PICUS

Navigační lety

- **EASA:** 200 hodin, z toho alespoň 100 hodin jako PIC nebo PICUS
- **FAA:** 500 hodin celkem, z toho 100 hodin jako součást požadavku na PIC
- **Transport Canada:** 100 hodin jako PIC (včetně min. 25 hodin v noci) + dalších 100 hodin jako PIC nebo 200 hodin jako druhý pilot nebo jejich kombinace

Přístrojové lety

- **EASA:** 75 hodin, z toho max. 30 hodin získaných v leteckých simulátorech
- **FAA:** 75 hodin (ve skutečných nebo simulovaných podmínkách), běžně max. 25 hodin na simulátoru, až 50 hodin na simulátoru v certifikovaném středisku
- **Transport Canada:** 75 hodin, z toho max. 25 hodin na pozemních trenažérech a max. 35 hodin ve vrtulnících

Noční lety

- **EASA:** 100 hodin jako PIC nebo druhý pilot
- **FAA:** 100 hodin celkem, možnost alternativního zápočtu za noční vzlety a přistání
- **Transport Canada:** 100 hodin, z toho min. 30 hodin v letounech

Teoretické zkoušky

- **EASA:** 14 předmětů (právní předpisy, znalosti o letadle, hmotnost a vyvážení, výkonnost, plánování letu, lidský faktor, meteorologie, navigace, provozní postupy, letové zásady, komunikace)
- **FAA:** 14 oblastí podobných EASA, včetně CRM a specifických požadavků pro vícemotorové letouny
- **Transport Canada:** Tři zkoušky - SAMRA, SARON a INRAT (pokrývající meteorologii, navigaci, plánování letu, legislativu, provoz letadel a přístrojové létání)

Zkouška dovednosti

- **EASA:** Ve vícepilotním letounu podle IFR, prokazující schopnost provádět postupy a manévry ve funkci PIC
- **FAA:** Praktická zkouška v oblastech podle § 61.157(e)
- **Transport Canada:** Na vícemotorovém letounu bez centrálního tahu, vybaveném pro IFR lety v řízeném vzdušném prostoru, v období 12 měsíců před žádostí

Specifické rozdíly a unikátní požadavky

- **EASA**
 - Výrazný důraz na výcvik součinnosti vícečlenné posádky (MCC)
- **FAA**
 - Požadavek na "dobrý morální charakter" žadatele
 - Možnost získání ATPL ve věku 21 let pro absolventy akreditovaných programů
 - Specifické alternativní způsoby splnění požadavků na nálet hodin
 - Výrazné odchylky od ICAO standardů, zejména v oblasti záznamu letových hodin druhého pilota
 - Specifické podmínky a odchylky pro vydávání zdravotního osvědčení, hlavně pro piloty ve funkci druhého pilota
- **Transport Canada**
 - Tři specifické teoretické zkoušky (SAMRA, SARON, INRAT)
 - Možnost započtení až 50 hodin na tříosých ultralehkých letounech
 - Požadavek na minimálně 900 hodin z celkových 1 500 hodin v letounech
 - Možnost započítání leteckých hodin z poměrně velké části z vrtulníků

V současné době existují mezi legislativou EU, FAA a TC značné rozdíly, přičemž zejména v oblasti licencování dopravních pilotů

by měla do budoucna existovat snaha eliminovat tyto rozdíly v oblastech, kde by taková unifikace byla efektivní a smysluplná. Obecně narůstá důraz na koncept otevřeného nebe, ale stále existuje rozpor mezi snahou o odstranění bariér na jedné straně a nejednotností letecké legislativy na straně druhé. Tento rozpor brzdí všeobecný pokrok v odvětví. Je však třeba uznat, že legislativní rozdíly často odrážejí specifika jednotlivých regionů. Dobrým příkladem je zavedení ATPL frozen v Evropě, které reaguje na tamní specifické podmínky. Vzhledem ke geografickým vlastnostem EU (kratší vzdálenosti mezi destinacemi) mají evropští piloti omezenější možnosti nalétat požadované množství hodin v počátcích své kariéry než jejich kolegové v jiných částech světa. Z analýzy vyplývá, že je nejednotnost požadavků často přehlížena a může v blízké budoucnosti vést ke sporům. Zároveň se začínají prosazovat koncepty mezinárodních leteckých společností a mezinárodních posádek v rámci aliancí leteckých dopravců. Vzniká tak otázka, jak by požadavky na tyto zaměstnance fungovaly, pokud by v každé zemi podléhali odlišným pravidlům. Která licence by byla preferována? A podle jakých kritérií by se mělo rozhodovat, která to bude? Určité regionální rozdíly v legislativě jsou však opodstatněné a reflektují specifika jednotlivých leteckých trhů a jejich historický vývoj. Místo úplné unifikace by proto mohlo být přínosnější zaměřit se na vzájemné učení a přejímání osvědčených postupů. Evropský systém může těžit z větší flexibility amerického přístupu, zatímco FAA a Transport Canada by mohly adaptovat některé prvky strukturovaného evropského výcviku. Cílem by mělo být sjednocení požadavků tam, kde je to praktické, při současném respektování regionálních specifik, která přinášejí do globálního leteckého odvětví jedinečné silné stránky.

Tato situace vytváří několik zásadních překážek pro letecký personál, který se rozhodne působit v jiné letecké legislativě:

a) Omezená mobilita leteckého personálu:

Pokud piloti chtějí působit v jiných jurisdikcích, musejí absolvovat zdoluhavý proces uznání jejich letecké způsobilosti, buď pomocí konverze či validace licence. Kromě licence samotné musejí také projít zdravotním posouzením podle místních požadavků, což znamená získání nového zdravotního osvědčení.

b) Nerovné podmínky pro piloty v různých regionech světa:

Určité legislativní odchylky mohou zvýhodňovat piloty z určitých regionů v přístupu k mezinárodnímu pracovnímu trhu.

c) Neefektivita v globálním leteckém průmyslu:

Letecké společnosti operující mezinárodně se musí orientovat v odlišných pravidlech různých jurisdikcí, což zvyšuje administrativní zátěž a náklady.

V této kapitole je navržena možná změna Evropské legislativy se zaměřením na praktičnost. Zaměřuje se především na oblasti, kde by mohla být evropská cesta benevolentnější v uznávání určitých leteckých hodin a zároveň jasnější a jednotnější. Úprava evropské legislativy v oblasti licencování leteckého personálu se zaměřením na ATPL by mohla přinést několik významných výhod:

- a) Zefektivnění procesu uznávání licencí ze třetích zemí, především z USA a Kanady, kde jsou standardy bezpečnosti a výcviku srovnatelné s evropskými.
- b) Zavedení alternativních způsobů zápočtu letové doby podle vzoru FAA a Transport Canada, což by usnadnilo splnění požadavků, které jsou v současném systému EASA obtížně dosažitelné.
- c) Rozšíření možností započítávání zkušeností z jiných kategorií letadel, podobně jako to umožňují systémy FAA a Transport Canada.
- d) Umožněním většího zápočtu hodin na leteckých simulátorech, specificky třídy FFS(Full Flight Simulator), které co nejvěrněji replikují reálné letové podmínky a scénáře, čímž by se zvýšila efektivita výcviku při zachování vysokých bezpečnostních standardů.
- e) Větší soulad teoretických zkoušek s cílem vytvořit jednotnější přístup k testování znalostí potřebných pro ATPL, což by usnadnilo mezinárodní mobilitu pilotů.
- f) Postupný vývoj směrem k jednoduššímu vzájemnému uznávání kvalifikací mezi hlavními leteckými jurisdikcemi.

Zjednodušení procesu konverze licencí ze třetích zemí

Piloti, kteří si přejí konvertovat své letecké licence na licence EASA, často musejí podstoupit zdoluhavý a administrativně náročný proces. V případě odlišných legislativních požadavků musí dodatečně splnit specifické požadavky EASA, například doléhat určité typy letových hodin, které v domovské jurisdikci mohli nahradit zkušenostmi z jiných kategorií letadel. Žadatelé také musí podstoupit prohlídku zdravotní způsobilosti 1. třídy provedenou autorizovaným leteckým lékařem EASA, a to i když již disponují ekvivalentním osvědčením z jiné jurisdikce. Povinností je rovněž absolvování teoretických zkoušek, často i z oblastí, které již byly předmětem testování v jejich původním systému.

V rámci zefektivnění tohoto procesu jsou navrženy následující úpravy:

- Vytvoření standardizovaného elektronického systému EASA pro podávání žádostí o konverzi licencí, který by zjednodušil a urychlil zpracování dokumentace.
- Zavedení systému částečného uznávání teoretických zkoušek na základě analýzy ekvivalence sylabů mezi EASA, FAA a Transport Canada, což by omezilo potřebu opakovaného testování již prokázaných znalostí.

Alternativní způsoby zápočtu letových hodin

V rámci EASA existuje v současné době několik možností započtení letových zkušeností z jiných kategorií letadel, ale ve srovnání s jinými jurisdikcemi jsou tyto možnosti prakticky méně flexibilní. EASA umožňuje započíst z TMG (motorový kluzák) nebo kluzáků maximálně 30 hodin jako PIC a teoreticky až 50 % celkových požadavků z vrtulníků, ovšem v praxi je tento zápočet

omezen dalšími specifickými požadavky na letovou dobu v letounech. Transport Canada nabízí v tomto ohledu praktičtější přístup, když z celkových 1500 požadovaných hodin vyžaduje na letounech pouze 900 hodin. To poskytuje pilotům jasně definovaný prostor pro započtení letové zkušenosti z jiných kategorií. Konkrétně mohou započítat až 50 hodin z kluzáků, 50 hodin z tříosých ultralehkých letadel a také mají jasná pravidla pro započítání zkušeností z vrtulníků - například až 35 hodin z vrtulníků do požadavku 75 hodin přístrojové doby. FAA umožňuje alternativní zápočet zkušeností palubních inženýrů. Za každé 3 hodiny v této pozici si pilot může zapsat jednu hodinu, a to až do výše 500 hodin. EASA také umožňuje držitelům průkazu palubního inženýra započíst 50 % jejich doby, ale pouze do maximální výše 250 hodin.

Navrhovaným řešením je rozšířit a zpřehlednit možnosti uznávání alternativních letových zkušeností v rámci EASA, konkrétně:

- Zvýšit limit pro započtení zkušeností z kluzáků a TMG z 30 na 50 hodin, což by odpovídalo kanadskému modelu.
- Zavést konkrétní možnost započtení zkušeností z ultralehkých letadel, podobně jako v Kanadě.
- Jasněji definovat prakticky využitelné zápočty z vrtulníků, zejména pro lety podle přístrojů.
- Zvážit navýšení limitu pro zápočet zkušeností palubních inženýrů na úroveň podobnou FAA.

Jednotné mezinárodní teoretické zkoušky

Současný systém teoretických zkoušek se v různých jurisdikcích liší. EASA vyžaduje 14 samostatných zkoušek, Transport Canada využívá systém tří hlavních zkoušek (SAMRA, SARON, INRAT) a FAA má svůj specifický přístup. Tato rozdílnost může vytvářet překážky pro piloty přecházející mezi jednotlivými systémy.

Pro zlepšení této situace jsou navrženy tyto realistické kroky:

- Částečné uznávání teoretických zkoušek mezi EASA, FAA a Transport Canada v oblastech, kde je obsah prokazatelně ekvivalentní. Pilot by tak musel doplnit pouze zkoušky ze specifických oblastí pro danou jurisdikci (např. letecké právo).
- Postupná modernizace procesu teoretických zkoušek v rámci EASA, což by mohlo zahrnovat větší využití elektronických prostředků při zachování potřebného dohledu a bezpečnostních protokolů.

V dlouhodobém horizontu, by mohla mezinárodní letecká komunita zvážit větší sjednocení teoretických zkoušek mezi hlavními leteckými jurisdikcemi. Kompletní sjednocení a digitalizace systému teoretických zkoušek by však vyžadovala rozsáhlou mezinárodní spolupráci, změny v legislativě mnoha zemí a vyřešení otázek týkajících se suverenity jednotlivých leteckých úřadů. Navrhovaná opatření v této práci respektují současnou realitu leteckého průmyslu a nabízejí praktické kroky, které by mohly být implementovány v rozumném časovém horizontu, zatímco udržují otevřené dveře pro potenciální hlubší integraci v budoucnosti.

4. Závěr

Analýza legislativních rámců EASA, FAA a Transport Canada odhalila, že ačkoliv všechny tři jurisdikce vycházejí ze standardů ICAO, jejich implementace se v mnoha ohledech liší. Společnými prvky všech tří systémů jsou základní požadavky jako celková doba letu 1500 hodin, zkušenosti v roli velitele letadla, lety podle přístrojů a noční lety. Tyto požadavky tvoří jádro kompetencí nezbytných pro funkci dopravního pilota. Zásadní rozdíly byly identifikovány v několika oblastech. FAA nabízí flexibilnější možnosti zápočtu letových hodin, Transport Canada používá zjednodušený systém teoretických zkoušek a EASA klade větší důraz na strukturovaný výcvik vícečlenné posádky. Významné rozdíly existují také v uznávání zkušeností z jiných kategorií letadel, kde evropský systém nabízí menší flexibilitu než jeho severoamerické protějšky.

V současném globalizovaném leteckém prostředí, kdy narůstá koncept otevřeného nebe a plně fungují mezinárodní aliance leteckých dopravců, představuje nejednotnost požadavků potenciální zdroj problémů. Piloti přecházející mezi jurisdikcemi čelí zdoluhavým procesům konverze licencí, nutnosti opakovat již absolvované zkoušky a dalším administrativním překážkám.

Na základě provedené analýzy bylo navrženo několik praktických úprav evropské legislativy:

- Zefektivnění procesu uznávání licencí ze třetích zemí prostřednictvím standardizovaného elektronického systému
- Rozšíření možností započítávání leteckých zkušeností alternativními způsoby
- Zavedení systému možnosti částečného uznávání teoretických zkoušek

Tyto změny respektují současnou realitu leteckého průmyslu a nabízejí realizovatelná řešení, která by mohla být implementována v rozumném časovém horizontu. Důležitým aspektem všech navrhovaných úprav je zachování vysokých bezpečnostních standardů.

Je třeba zdůraznit, že určité regionální rozdíly v legislativě jsou opodstatněné a reflektují specifika jednotlivých regulačních rámců. Příkladem je koncept ATPL frozen v Evropě, který reaguje na geografická specifika regionu. Místo úplné unifikace je proto přínosnější zaměřit se na vzájemné učení a přejímání osvědčených postupů mezi jednotlivými systémy.

V dlouhodobém horizontu by bylo užitečné uvažovat o větším sjednocení těchto systémů, což by usnadnilo mezinárodní mobilitu kvalifikovaného leteckého personálu a zefektivnilo globální letecký provoz. Taková unifikace by však vyžadovala rozsáhlou mezinárodní spolupráci a řešení otázek týkajících se suverenity jednotlivých leteckých úřadů.

Reference

[1] SEDLÁČKOVÁ NOVÁK, Alena. *Letecké právní normy a ochrana civilního letectva před činy protiprávního zasahování*. Vydání první. V Žilíně: Žilinská univerzita v Žilíně v EDIS-vydavatelství ŽU, 2013. ISBN 978-80-554-0795-1.

[2] The first U.S Federal Pilot License. Dostupné z: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/about/history/milestones/first_pilots_license.pdf (citováno dne: 5. prosince 2024).

[3] Air Commerce Act of 1926. Dostupné z: <https://libraryonline.erau.edu/online-full-text/books-online/aircommerceact1926.pdf> (citováno dne 3. ledna 2025).

[4] PRUŠA, Jiří; BRANDÝSKÝ, Martin; HLINOVSKÝ, Luboš; HORNÍK, Jiří; PAZOUREK, Michal et al. *Svět letecké dopravy*. II., rozšířené vydání. Praha: Gallileo Training, 2015. ISBN 978-80-260-8309-2.

[5] DIEDERIKS-VERSCHOOR, Isabella Henrietta Philepina. *An introduction to air law*. 8th rev. ed. Alphen aan den Rijn: Kluwer Law International, 2006. ISBN 90-411-2458-6.

[6] Convention on International Civil Aviation - DOC 7300. Dostupné z: <https://www.icao.int/publications/pages/doc7300.aspx> (citováno dne 20. ledna 2025).

[7] International Civil Aviation Organization. *The Convention on International Civil Aviation Annexes 1 to 18*. Dostupné z: https://www.icao.int/safety/airnavigation/NationalityMarks/annexes_booklet_en.pdf (citováno dne 10. února 2025).

[8] ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ. *Předpis L1 – O způsobilosti leteckého personálu civilního letectví*. Praha: Úřad pro civilní letectví, 2013. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-1/index.htm> (citováno dne 16. března 2025).

[9] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon)*, ve znění pozdějších předpisů. Sbírka zákonů České republiky, 1997, částka 16

[10] International Civil Aviation Organization. *Annex 1 to the Convention on International Civil Aviation: Personnel Licensing*. Dostupné z: <https://www.icao.int/publications/Pages/doc7300.aspx>, část 2.6.2.1 (citováno dne 18. března 2025)

[11] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139 ze dne 4. července 2018 o společných pravidlech v oblasti civilního letectví a o zřízení Agentury Evropské unie pro bezpečnost letectví. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32018R1139> (citováno dne 21. března 2025)

[12] Nařízení Komise (EU) č. 1178/2011 ze dne 3. listopadu 2011, kterým se stanoví technické požadavky a správní postupy týkající se posádek v civilním letectví. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32011R1178> (citováno dne 23. března 2025)

[13] Úmluva č. 35/1924 Sb., o úpravě letectví. Dostupné z: <https://www.aspi.cz/products/lawText/1/3515/1/2/umluva-c-35-1924-sb-o-uprave-letectvi/umluva-c-35-1924-sb-o-uprave-letectvi> (citováno dne 25. března 2025)

[14] Canadian Aviation Regulations (SOR/96-433). Dostupné z: <https://tc.canada.ca/en/corporate-services/acts->

regulations/list-regulations/canadian-aviation-regulations-sor-96-433 (citováno dne 25. března 2025)

[15] Convention on International Civil Aviation (Doc 7300). Dostupné z: <https://www.icao.int/publications/Pages/doc7300.aspx> (citováno dne 26. března 2025)

[16] Canadian Aviation Regulations (SOR/96-433), Section 401.34. Dostupné z: <https://lois-laws.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-96-433/FullText.html#s-401.34> (citováno dne 1. dubna 2025)

[17] MARTÍNEK, Karel. Příloha 1: Převážní práva a letecké svobody. České vysoké učení technické v Praze, 2017. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73999/F6-DP-2017-Martinek-Karel-priloha-1-Prepravni-prava-a-letecke-svobody.pdf?sequence=-1&isAllowed=y> (citováno dne 1. dubna 2025)

[18] European Commission. Bilateral agreements on civil aviation safety. Dostupné z: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/aviation-safety/aviation-safety-and-international-cooperation/bilateral-agreements-civil-aviation-safety_en (citováno dne 2. dubna 2025)

[19] Transport Canada. Standard 421 - Flight Crew Permits, Licences and Ratings. Canadian Aviation Regulations (CARs), Section 421.11. Dostupné z: https://tc.canada.ca/en/corporate-services/acts-regulations/list-regulations/canadian-aviation-regulations-sor-96-433/standards/standard-421-flight-crew-permits-licences-ratings-canadian-aviation-regulations-cars#421_11 (citováno dne 5. dubna 2025)

[20] Zákon č. 143/1998 Z. z., o civilnom letectve (letecký zákon) a o zmene a doplnení niektorých zákonov. Dostupné z: <https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/1998/143/> (citováno dne 5. dubna 2025)

[21] European Union Aviation Safety Agency. Organizační struktura agentury. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/cs/the-agency/agency-organisation-structure> (citováno dne 8. dubna 2025)

[22] Federal Aviation Administration. About FAA. Dostupné z: <https://www.faa.gov/about> (citováno dne 8. dubna 2025)

[23] NAV CANADA. About Us. Dostupné z: <https://www.navcanada.ca/en/corporate/about-us.aspx> (citováno dne 8. dubna 2025)

[24] Federal Aviation Administration. Who We Are: Offices & Locations. Dostupné z: https://www.faa.gov/jobs/who_we_are/offices_locations (citováno dne 8. dubna 2025)

[25] Transport Canada. About Transport Canada – Corporate Information. Dostupné z: <https://tc.canada.ca/en/corporate-services/about-transport-canada-corporate-information> (citováno dne 10. dubna 2025)

[26] Legal Information Institute. 14 CFR Part 61, Subpart G - Airline Transport Pilots. Cornell Law School. Dostupné z:

<https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/part-61/subpart-G> (citováno dne 19. dubna 2025)

[27] Federal Aviation Administration. Aeronautical Information Publication (AIP), Part 1: GEN, Section 1.7. Dostupné z: https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aip_html/part1_gen_section_1.7.html (citováno dne 19. dubna 2025)

[28] Legal Information Institute. 14 CFR Chapter I, Subchapter D - Airmen. Cornell Law School. Dostupné z: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/chapter-I/subchapter-D> (citováno dne 19. dubna 2025)

[29] ICAO. Annex 1 to the Convention on International Civil Aviation - Personnel Licensing (12th Edition). International Civil Aviation Organization. (citováno dne: 5. února 2025)



POROVNANIE EFEKTÍVNOSTY ZÁKLADNÝCH KONCEPCIÍ UAV VZHLADOM NA PREVÁDZKOVÉ PODMIENKY

Oleksandra Kyrylova
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Robert Dianovský
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Drones are increasingly being used in various fields to simplify and enhance human work. They are utilized for various purposes such as monitoring, mapping, agriculture, rescue operations, inspections, and many other goals. Their growing popularity has led to the need for selecting the appropriate type of drone for specific missions and operational conditions. The goal of this work was to compare the efficiency of the basic UAV concepts in relation to operational conditions, primarily multirotors and fixed-wing UAVs in various operational scenarios. Based on this analysis, a methodological tool in the form of a "Scoring System" was developed to assist users without technical knowledge in selecting the appropriate UAV. The system was designed as a universal tool and tested on two representative UAV concepts of similar size: the DJI Mavic 3 Enterprise (multirotor) and the senseFly eBee X (fixed-wing UAV). The "Scoring System" provides a simple and clear comparison of these drones based on criteria such as flight time, type of activity, accuracy and availability of RTK/PPK, maneuverability, environment, and operational conditions. Finally, a verification form was created, which was filled out by 16 experienced drone pilots to verify the functionality of the "Scoring System" in real-world conditions. The form contained specific scenarios in which the pilots, based on their experience and knowledge, had to select the appropriate type of drone for each task. This process helped confirm that the system is capable of correctly assessing UAV types and providing effective advice even for users without technical knowledge about drones. The results of this work can serve as a basis for further development of similar systems that will facilitate decision-making when selecting UAVs for the general public.

Keywords

fixed-wing UAV, Scoring System, Multirotor, Comparison.

1. Úvod

Bezpilotné letecké prostriedky (UAV) sa v posledných rokoch stali dôležitou súčasťou rôznych oblastí ľudskej činnosti – od mapovania a monitoringu až po záchranné operácie a presné poľnohospodárstvo. Ich dynamický technologický vývoj viedol k vzniku viacerých koncepcných riešení, ktoré sa odlišujú konštrukciou, výkonom a spôsobom využitia. Vzhľadom na širokú škálu dostupných UAV a rozmanitosť prevádzkových scenárov vznikla potreba jednoduchého systému, ktorý by umožnil efektívne rozhodovanie pri výbere vhodného typu dronu.

Práca je zameraná na porovnanie efektívnosti základných koncepcií UAV vzhľadom na prevádzkové podmienky, hlavne multikoptéry a UAV s pevným krídlom pri rôznych scenároch prevádzky. Na základe tejto analýzy bol navrhnutý metodický nástroj vo forme bodovacieho systému, ktorý má za úlohu uľahčiť výber vhodného UAV aj pre používateľov bez technických znalostí. Systém bol navrhnutý ako univerzálny a testovaný na dvoch zástupcoch základných UAV koncepcií: DJI Mavic 3 Enterprise (multikoptéra) a senseFly eBee X (UAV s pevným krídlom).

Pri spracovaní práce boli využité metódy analýzy, porovnanie a vyhodnocovania údajov získaných prostredníctvom formulára. Význam práce spočíva v tom, že vytvára základ pre rozhodovací systém, ktorý môže byť v budúcnosti rozšírený a aplikovaný pri výbere UAV v rôznych oblastiach.

Práca je rozdelená do niekoľkých častí. V úvodných kapitolách sa analyzujú typy UAV a ich technické riešenia. Následne sa zhodnocuje súčasné využitie UAV v praxi a faktory ovplyvňujúce

ich výkonnosť. Praktická časť práce spočíva v návrhu metodiky výberu UAV, opísaní bodovacieho systému a porovnaní jeho výsledkov s výstupmi z formulára vyplneného pilotmi dronov. Záver práce obsahuje zhodnotenie funkčnosti systému a návrhy na jeho ďalší vývoj.

2. Typy konštrukčných riešení UAV

V posledných rokoch sa v rôznych oblastiach zvýšilo používanie bezpilotných leteckých prostriedkov (dronov). Dron je diaľkovo alebo autonómne riadené bezpilotné zariadenie. Moderné drony sa ovládajú ľahko a pohodlne, vďaka čomu boli natoľko populárne, že sa stali dostupnými po celom svete. Bezpilotných leteckých prostriedkov možno rozdeliť do dvoch skupín. Bezpilotné letecké prostriedky s fixnými nosnými plochami a bezpilotné letecké prostriedky s rotujúcimi nosnými plochami. **Tato kapitola sa venuje súčasným vývojom UAV a ich type konštrukcií, a presne o troch populárnych konceptoch dronov:** Multikoptéry, UAV s pevným krídlom, Hybridné UAV.

2.1. Multikoptéry

V súčasnosti je jedným z najpopulárnejších UAV s rotujúcou nosnou plochou multikoptéry. Majú množstvo výhod, ako je schopnosť vertikálneho vzletu a pristátia, dobrú mobilitu, jednoduchú mechanickú konštrukciu a nosnosť. Multikoptéra používa viacero vrtúľ (namiesto jedného listu rotora ako tradičný vrtuľník) na zabezpečenie vztlaku. Okrem toho nemá chvostový rotor (používaný na zabezpečenie kontroly natočenia a proti krútiacemu momentu generovanému pohonom hlavného rotora vrtuľníka).

Sú rôzne konfigurácie multikoptér: bikoptyéry a trikoptyéry, kvadrokoptyéra, hexakoptyéra ,oktokoptyéra.

2.1.1. Základná konštrukcia Multikoptyéry

Multikoptyéry majú jednoduchý dizajn a okrem riadiaceho systému pozostáva najmä s daným počtom ramien, elektromotor, vrtúľ, batérie a letový počítač. Rôzne hardvérové komponenty vytvárajú rôzne letové vlastnosti a existuje optimálny dizajn pre každú danú úlohu.

Rám multikoptyéry je konštrukcia, ktorá sa zvyčajne skladá z niekoľkých nosníkov, na ktorých sú namontované motory, hlavnej plošiny, na ktorej je umiestnená všetka elektronika, a hornej plošiny, ktorá chráni všetky elektronické komponenty. [1]

Vrtuľa je lopatkové zariadenie, ktoré pracuje vo vzduchu a je poháňané motorom a slúži ako pohon, ktorý premieňa výkon motora na ťah. Keď sa listy vrtule otáčajú, zachytávajú vzduch a vrhajú ho v smere opačnom k pohybu korpusu dronu. Pred skrutkou je vytvorená zóna nízkeho tlaku a za skrutkou zóna vysokého tlaku. Na ich ovládanie sa používa tzv. throttle (plyn), vďaka ktorému je možné upravovať rýchlosť a výšku letu. Moderné kamerové drony majú zvyčajne štyri rotorové listy, ktoré umožňujú dronu vykonávať niekoľko pohybov, a to: zatáčanie (yaw), klopenie (pitch), náklon (roll), a plyn (throttle). [2]



Obrázok 1, zdroje [2]

Batéria je zdrojom energie pre akýkoľvek elektromotor používaný pre UAV. Moderné UAV zvyčajne používajú lítium-polymérové (LiPo) batérie. Jeden článok takejto batérie má menovité napätie 3,7 V (plne nabitý článok je 4,2 V a úplne vybitý článok 3 V). [1]

Kolektorový elektromotor je jednoduchý typ motora, ktorý obsahuje rotor s vinutiami, stator s permanentnými magnetmi, kolektor a kefy v kontakte s kolektorom. Napája sa jednosmerným prúdom, pričom zmena napätia mení rýchlosť rotora. Tento motor je lacný a jednoduchý, ale má nižšiu účinnosť, vysoký elektrický šum a krátku životnosť, preto sa využíva hlavne v menších a jednoduchších multikoptyéroch.

Bezkefkový elektromotor je vysoko účinný a má dlhú životnosť, pretože nemá komutátor ani kefy, čím minimalizuje trenie. Tento motor využíva tri vinutia, z ktorých na dvoch je v každom momente privádzané napätie, zatiaľ čo tretie je vypnuté, čo vytvára rotujúce magnetické pole. Na riadenie otáčania je potrebný špeciálny regulátor otáčok, a rotor je vybavený magnetmi, pričom stator s vinutiami zostáva stacionárny. Bezkefkové motory sa delia na vnútorné (inrunners) a vonkajšie (outrunners) rotory. Pre multikoptyéry sa preferujú vonkajšie

motory kvôli vyššiemu krútiacemu momentu a absencii potreby redukčného prevodu.

2.1.2. Riadiaca jednotka a ovládanie multikoptyéry

Rádiový riadiaci systém UAV sa skladá z vysielача, ktorý používa operátor, a prijímača na palube dronu. Na efektívne ovládanie dronu je potrebné nielen porozumieť jeho konštrukcii, ale aj zvládnuť základné letové pojmy ako zatáčanie, klopenie, náklon a plyn. Väčšina dronov sa riadi pomocou RC ovládačov, ktoré môžu byť vybavené dotykovými displejmi, držiakmi na mobilné zariadenia a vlastnými displejmi pre telemetrické údaje. Ovládače majú dva joysticky na riadenie pohybu dronu a rôzne tlačidlá, ako je tlačidlo na návrat dronu do miesta vzletu, trimovacie tlačidlá na korekciu rovnováhy a tlačidlá na spustenie automatických letových režimov. Okrem toho, ovládače často obsahujú programovateľné tlačidlá C1 a C2, ktoré môžu byť priradené k ľubovoľným funkciám podľa preferencií pilota. Tieto tlačidlá umožňujú rýchly prístup k špecifickým operáciám, ako je napríklad aktivácia špeciálnych letových režimov, zmena nastavení kamery alebo iných kritických funkcií, čím zvyšujú flexibilitu a komfort ovládania dronu. Niektoré ovládače tiež obsahujú indikátor nabitia batérie a tlačidlo viazania zariadenia (binding) na spárovanie s dronom.

2.1.3. Princíp letu Multikoptyéry

Multikoptyéry lietajú na princípe zdvihu a krútiaceho momentu. Každá vrtuľa vytvára vztlak aj krútiaci moment — ak sa vrtuľa otáča v smere hodinových ručičiek, rameno sa snaží otáčať opačne (tretí Newtonov zákon). Preto sa používajú dve pravotočivé a dve ľavotočivé vrtule, ktoré efekt krútiaceho momentu rušia a umožňujú stabilné vznášanie. Pri lete dopredu predné motory znížia a zadné zvýšia otáčky. Náklon UAV sa vytvára rovnakým spôsobom. Otočenie okolo vertikálnej osi sa dosahuje zvýšením výkonu pravotočivých alebo ľavotočivých motorov podľa smeru otáčania.

2.2. UAV s pevným krídlom

Drony s pevnými krídlami sa líšia dizajnom, aerodynamickou konfiguráciou, účelom a spôsobom vzletu a pristátia.

2.2.1. Konštrukčné vlastnosti UAV s pevným krídlom

Klasické bezpilotné lietadlá s pevnými krídlami (UAV) majú tradičný aerodynamický dizajn podobný konvenčným lietadlám. Ktoré sa skladá s trupu, pevne upevnené krídla a chvostové plochy (zvyčajne klasické alebo v tvare V a T).

Trup

Trup je centrálna časť konštrukcie, ktorá slúži na umiestnenie všetkých kľúčových systémov dronu, vrátane batérií, riadiaceho systému, elektroniky a senzorov. Trup môže byť vyrobený z rôznych materiálov, ako sú uhlíkové vlákna, plasty a kovové zliatiny, aby sa zabezpečila potrebná pevnosť a ľahkosť.

Pevne upevnené krídla

Dron s pevným krídlom môže mať rôzne typy konštrukcií krídel. Najbežnejšou konštrukciou je jednoplošník, ktorý sa vyznačuje jednoduchou konštrukciou, spoľahlivými aerodynamickými vlastnosťami a nízkym indukovaným odporom v porovnaní s dvojplošníkmi a

trojplošníkmí. V rámci jednoplošníkov existujú rôzne konfigurácie umiestnenia krídel, ako napríklad dolnoplošník, stredoplošník, hornoplošník, a typ „Parasol“. Niektoré drony používajú konfiguráciu „Flying Wing“, čo je plavidlo bez tradičného chvosta. Táto konštrukcia má vysokú aerodynamickú účinnosť, ale vyžaduje komplexný riadiaci systém na zabezpečenie stability počas letu. Existujú aj UAV so zdvíhacím trupom, v ktorom telo dronu vytvára vztlak. To umožňuje zvýšenú účinnosť pri vysokých rýchlostiach, ale robí takéto lietadlá menej vhodnými na krátke vzlety a pristátia. Výber konštrukcie krídla teda závisí od účelu dronu: jednoplošné drony sú vhodné pre dlhodobé misie a prieskum a lietajúce krídlo „Flying Wing“ alebo zdvíhací trup je pre vysokorýchlostné úlohy.

Chvostové plochy

UAV s pevným krídlom má horizontálny stabilizátor, horizontálna chvostová plocha umiestnená v zadnej časti lietadla. Okrem toho chvostová plocha pomáha regulovať zmeny ťažiska a ťažiska spôsobené zmenami rýchlosti a polohy, alebo pri spaľovaní paliva, pri vypúšťaní nákladu alebo užitočného zaťaženia z lietadla. Chvostová plocha v tvare V je výhodná, pretože tento typ chvosta vytvára menej indukovaný odpor. Na druhej strane integrácia riadenia náklonu a zatáčania je technicky zložitá a vyžaduje si komplexnejší riadiaci systém. Usporiadanie V-chvostov tiež kladie veľké zaťaženie na zadnú časť trupu počas náklonu a vybočenia. Chvostová plocha v tvare T poskytuje hladšie a rýchlejšie prúdenie vzduchu a má presnejšiu kontrolu náklonu. Vertikálne stabilizátory musia byť vyrobené z pevného a tuhého materiálu. T-chvost vyžaduje drahé kompozitné materiály. Ak je krídlo dronu s pevným krídlom v príliš veľkom uhle nábehu, môže blokovat prúdenie vzduchu, ktorý by mal prúdiť cez chvost. [3]

2.2.2. Princíp lietania UAV s pevným krídlom

UAV s pevným krídlom je schopné lietať vďaka vztlaku vytvorenému aerodynamickým tvarom pevného krídla pri pohybe vpred určitou rýchlosťou, ktorého do predný pohyb sa dosahuje rôznymi spôsobmi (spravidla pomocou motora alebo racionálnym využívaním stúpavých prúdov vzduchu. Z tohto dôvodu potrebujú použiť energiu na pohyb vpred a nemôžu sa udržiavať v jednom bode v priestore. Dron s pevným krídlom sa pohybuje dopredu rýchlejšie ako multikoptéra, jeho manévrovanie trvá dlhšie a teda aj samotné monitorovanie oblasti.

2.3. Hybridné UAV (VTOL UAV s pevným krídlom)

Hybridné UAV kombinujú výhody multikoptér a UAV s pevným krídlom. Umožňujú vertikálny vzlet a pristátie (VTOL) ako multikoptéry, no vo vzduchu prechádzajú do energeticky efektívneho letu ako drony s pevným krídlom, čo im umožňuje prekonať väčšie vzdialenosti a dlhšie vydržať vo vzduchu. Dokážu sa aj vznášať na mieste, čo je výhodné pri dohľade, mapovaní či záchranných operáciách. Vďaka tejto všestrannosti sú vhodné na široké spektrum úloh, hoci sú zložitejšie a drahšie ako tradičné UAV. [4]

3. Analýza súčasného stavu riešenej problematiky

Táto kapitola sa zameriava na analýzu oblastí využitia UAV z pohľadu rôznych konštrukčných riešení v rozličných odvetviach.

V rámci tejto analýzy sa najskôr stručne predstaví historický vývoj UAV, následne sa popíšu súčasné možnosti ich využitia v rôznych oblastiach a na záver sa vykoná zhodnotenie analýzy súčasného stavu.

3.1. Historický vývoj UAV

História bezpilotných lietadiel sa začala na začiatku 20. storočia s prvými pokusmi o diaľkovo riadené lietadlá, ako britský De Havilland Queen Bee. Počas druhej svetovej vojny boli vyvinuté prvé samonavigačné zbrane, ako nemecká raketa V-1. V druhej polovici 20. storočia sa bezpilotné prostriedky ďalej rozvíjali, pričom vznikali experimentálne projekty ako lietajúce vozidlá pre armádu. Dnes majú UAV široké využitie – od vojenských operácií (napríklad MQ-1 Predator) až po civilné oblasti ako poľnohospodárstvo, mapovanie či doručovanie zásielok. [5]

3.2. Súčasne využitie UAV v rôznych oblastiach

V poslednom čase sa UAV (bepilotné letecké prostriedky) stali veľmi populárnymi v rôznych oblastiach využitia. Kým v minulosti boli UAV prevažne doménou armády na účely prieskumu a bojových operácií, dnes sú neoddeliteľnou súčasťou mnohých oblastí nášho každodenného života – od poľnohospodárstva, cez záchranné zložky, až po dopravu a logistiku.

3.2.1. UAV v hasičských a záchranných operáciách

Bezpilotné systémy výrazne zefektívňujú vyhľadávanie a lokalizáciu požiarov pomocou termokamier. Umožňujú rýchly prehľad o situácii, koordináciu zásahu a plánovanie bezpečných trás. UAV sa využívajú aj na preventívne monitorovanie lesov a pátracie operácie. Drony ako DJI Matrice 300 RTK so senzorom Zenmuse H20T alebo DJI Mavic 3 Thermal kombinujú termovíziu a RGB kameru, poskytujú dlhý čas letu, odolnosť voči nepriaznivému počasiu a prenos obrazu v reálnom čase, čo je kľúčové pre efektívne riadenie zásahu. [6]

3.2.2. UAV v oblasti verejnej bezpečnosti a polícii

Drony sa využívajú na hliadkovanie, monitorovanie územia a kontrolu verejného poriadku počas podujatí. Pomáhajú pri vyšetrovaní nehôd, pátraní po nezvestných a koordinácii zásahov. S tepelnou detekciou môžu identifikovať pohyb osôb v tme alebo zlom počasi. Pre tieto účely sa často používajú UAV ako DJI Matrice 30T (s zoom kamerou, širokouhlou a termálnou kamerou) a DJI Mavic 3 Enterprise Thermal (kompaktný a rýchlo nasaditeľný). Tieto drony umožňujú efektívne sledovanie a rýchlu reakciu v náročných podmienkach, čo ich robí ideálnymi pre bezpečnostné zložky. [6]

3.2.3. UAV v lesníctve a ochrane životného prostredia

Drony umožňujú sledovať rozsiahle lesné územia, detegovať požiare, monitorovať nelegálnu ťažbu dreva alebo zakladanie ohňov. Multispektrálne snímanie pomáha pri diagnostike zdravotného stavu stromov, zisťovaní výskytu škodcov a vyhodnocovaní vývoja vegetácie. UAV sa používajú aj na mapovanie územia a sledovanie ohrozených druhov živočíchov. Na tieto účely sa často využívajú drony ako senseFly eBee X,

ktorý vďaka svojej výdrži a možnosti nesenia multispektrálnych alebo termálnych senzorov umožňuje efektívne monitorovanie rozsiahlych a ťažko dostupných oblastí. Tiež je obľúbený DJI Mavic 3 Multispectral, ktorý je špeciálne navrhnutý na analýzu vegetácie a presné poľnohospodárske či lesnícke aplikácie. Vďaka týmto UAV možno získať cenné dáta bez nutnosti fyzickej prítomnosti v teréne, čo zvyšuje efektívnosť a bezpečnosť pri monitorovaní environmentálnych podmienok a ochrane prírody. [6]

3.2.4. *UAV v geodézii a mapovaní*

Bezpilotné letecké prostriedky (UAV) zásadne zmenili geodéziu a mapovanie tým, že umožňujú rýchly, efektívny a presný zber dát. Využívajú technológie ako LIDAR na tvorbu detailných 3D modelov terénu, čo je užitočné pri stavbe infraštruktúry, monitorovaní zmien krajiny či vyhľadávaní nelegálnych stavieb. Drony s pevným krídlom (napr. senseFly eBee X, WingtraOne) sú ideálne na mapovanie veľkých oblastí, zatiaľ čo multikoptéry (napr. DJI Matrice 300 RTK) sa používajú na detailné snímanie v ťažko prístupných alebo urbanizovaných lokalitách. [6]

3.3. *Zhodnotenie analýzy súčasného stavu*

Na základe analýzy rôznych oblastí využitia UAV je zrejmé, že správny výber typu bezpilotného prostriedku je kľúčový pre efektívne a bezpečné vykonanie misie. Každá aplikácia – od geodézie a záchranných operácií až po poľnohospodárstvo či logistiku – kladie odlišné požiadavky na výdrž batérie, dolet, nosnosť, senzory, manévrovateľnosť a odolnosť voči počasiu. UAV s pevným krídlom sú ideálne na veľkoplošné mapovanie, zatiaľ čo multikoptéry excelujú v členitom teréne a na obmedzených priestoroch. Nesprávna voľba UAV môže viesť k neefektívnemu zberu dát alebo k zlyhaniu misie. Preto je nevyhnutné prispôsobiť výber konkrétnym podmienkam, cieľom operácie a technickým požiadavkám.

4. *Vplyv prevádzkových podmienok na lety UAV*

Pri plánovaní UAV misie je kľúčové zohľadniť prevádzkové prostredie – počasie, terén, letový priestor a čas letu – pretože výrazne ovplyvňujú výkon UAV, výber platformy aj letový plán. Každý typ UAV má svoje výhody a obmedzenia, preto je dôležité systematicky porovnávať možnosti. Na tento účel bude v ďalšej časti predstavený bodovací systém na výber vhodného typu UAV podľa praktických kritérií. [7]

4.1. *Vplyv počasia a klimatických podmienok*

Poveternostné podmienky ako vietor, dážď, hmla, teplota či elektromagnetické poruchy majú veľký vplyv na let UAV. Nepriaznivé počasie môže znížiť stabilitu, skrátiť výdrž batérie, zhoršiť navigáciu a poškodiť zariadenie. Multikoptéry vynikajú v prostredí so zníženou viditeľnosťou a v náročnom teréne vďaka schopnosti vznášať sa a rýchlo pristáť. UAV s pevným krídlom sú vhodnejšie na lety pri silnom a trvalom vetre vďaka lepšej aerodynamike. Pri veľmi nepriaznivých podmienkach (silné búrky, intenzívne zrážky) sa odporúča let zrušiť, pričom dôležitá je aj certifikácia UAV na let v náročnom prostredí.

4.2. *Typ činnosti*

Výber vhodného typu UAV závisí od charakteru činnosti, konfigurácie, prevádzkových požiadaviek a prostredia. UAV s pevným krídlom sú ideálne na mapovanie a monitorovanie veľkých území vďaka dlhému doletu a času letu, pričom umožňujú efektívne snímanie a tvorbu ortofotomáp. Naopak, multikoptéry vynikajú flexibilitou pri sledovaní objektov v zložitom teréne, pri záchranných operáciách (SAR) a priemyselných inšpekciách v blízkosti infraštruktúry. V poľnohospodárstve sa multikoptéry využívajú na ciele postrekovanie a detailný monitoring plodín, zatiaľ čo UAV s pevným krídlom na rýchly zber dát z veľkých polí. Vo videografii dominujú multikoptéry vďaka stabilite a presnému ovládaniu pri nízkych letoch. Správna voľba UAV je kľúčová pre efektívny a bezpečný výsledok.

4.3. *Prostredie*

Jedným z kľúčových faktorov pri výbere dronu je prostredie, v ktorom má UAV operovať. Multikoptéry sú ideálne pre zložité alebo obmedzené priestory, ako sú mestské uličky, husté lesy či horské oblasti, vďaka schopnosti vertikálneho vzletu, pristátia a presného manévrovania. Naopak, drony s pevným krídlom majú výhodu vo veľkých otvorených priestoroch, ako sú polia, púšte alebo pobrežia, kde efektívne pokrývajú rozsiahle územia s nízkou spotrebou energie. Ich využitie je však obmedzené v úzkych alebo zastavaných oblastiach.

4.4. *Vzlet a pristátie*

Ako vyplýva z kapitoly „Typ konštrukčného riešenia UAV“, hlavný rozdiel medzi multikoptérmi a UAV s pevným krídlom spočíva v spôsobe vzletu a pristátia. Multikoptéry vynikajú schopnosťou vertikálneho vzletu a pristátia (VTOL), čo im umožňuje operovať aj z obmedzených alebo nerovných plôch. Táto flexibilita je výhodná najmä v mestskom prostredí, v horských oblastiach či pri operáciách, ktoré vyžadujú rýchle nasadenie a stiahnutie dronu. UAV s pevným krídlom naopak väčšinou potrebujú rovnú a dlhšiu vzletovú dráhu, prípadne pomoc katapultu, a pri pristátí využívajú zachytávacie systémy alebo klzné pristátie. Tieto nároky ich obmedzujú na otvorené priestory, ako sú polia, lúky alebo veľké letecké zóny.

4.5. *Čas letu*

Jedným z dôležitejších parametrov pri výbere vhodného UAV je **dĺžka trvania letu**, ktorá priamo súvisí s energetickou efektívnosťou zariadenia. **UAV s pevným krídlom** sú v tomto smere výrazne efektívnejšie vďaka svojmu aerodynamickému tvaru a schopnosti klzavého letu bez potreby neustáleho aktívneho vztlaku. **Komerčné modely UAV s pevným krídlom** s hmotnosťou do 2 kg (napr. senseFly eBee X) sú schopné dosahovať letové časy v rozmedzí **60 až 90 minút**, v závislosti od konfigurácie, senzora a poveternostných podmienok. Vyspelé profesionálne alebo vojenské platformy môžu vo vzduchu zotrvať aj **viac ako 10 hodín**. Táto vlastnosť ich predurčuje na **dlhodobé snímkovanie, monitoring rozľahlých území či geodetické úlohy**, kde je nepretržité pokrytie a kontinuita letu kľúčová. Naopak, **multikoptéry**, ako je napríklad **DJI Mavic 3 Enterprise**, majú **čas letu obmedzený do 45 minút**. Tento kratší čas je spôsobený tým, že celú hmotnosť dronu musí neustále

niekoľko rotorov, ktoré udržiavajú zariadenie vo vzduchu prostredníctvom trvalého vztlaku. [8] [9]

4.6. Manévrovateľnosť

Pri porovnaní manévrovateľnosti medzi multikoptérmi a UAV s pevným krídlom majú výraznú výhodu multikoptéry. Vďaka svojej konštrukcii s viacerými rotormi, ktoré umožňujú pohyb vo všetkých smeroch a schopnosť vznášať sa na mieste, sú extrémne flexibilné. Táto vlastnosť zaručuje vysokú presnosť manévrovania a kontrolu, čo je kľúčové pri operáciách vyžadujúcich priblíženie k objektom alebo navigáciu v zložitých podmienkach, ako sú úzke mestské uličky, interiéry budov, blízkosť infraštruktúrnych prvkov či členitý terén. Naopak, UAV s pevným krídlom sú navrhnuté pre stabilný a plynulý let pri vyšších rýchlostiach a na väčšie vzdialenosti. Ich manévrovateľnosť je obmedzená väčším polomerom zatáčania a potrebou rozsiahlejšieho priestoru na zmenu smeru alebo výšky letu.

4.7. Navigácia, presnosť a dostupnosť RTK/PPK

Navigačný systém UAV zabezpečuje presnú lokalizáciu, orientáciu a stabilné diaľkové riadenie. GPS ponúka vysokú presnosť v reálnom čase, GNSS zahŕňa viacero systémov (GPS, GLONASS), čím zvyšuje spoľahlivosť určovania polohy. INS sleduje pohyb UAV pomocou gyroskopov a akcelerometrov bez satelitného signálu, ale trpí "driftom". Kombinácia GNSS a INS je dnes najspoľahlivejšia – GNSS poskytuje polohu, INS orientáciu aj pri výpadku signálu. RTK (Real-Time Kinematics) umožňuje korekcie GNSS údajov v reálnom čase s presnosťou 1–2 cm, vhodné pre oblasti s dobrým signálom. PPK (Post-Processing Kinematics) zaznamenáva údaje počas letu a spracúva ich neskôr, pričom dosahuje rovnakú presnosť ako RTK a je spoľahlivejší v zložitých podmienkach. [10]

5. Návrh metodiky výberu typu UAV

V praktickej časti práce bol vytvorený jednoduchý bodovací systém na výber vhodného UAV pre používateľov bez technických znalostí. Systém je navrhnutý ako univerzálny a testovaný na dvoch zástupcoch základných UAV koncepcií: multikoptér DJI Mavic 3 Enterprise a UAV s pevným krídlom senseFly eBee X. Hybridné UAV neboli zahrnuté kvôli ich špecifickým vlastnostiam. Systém hodnotí UAV podľa kategórií: typ činnosti, klimatické podmienky, presnosť a dostupnosť RTK/PPK, prostredie, vzlet a pristátie, čas letu a manévrovateľnosť.

5.1. Bodovací systém

Systém hodnotí UAV na základe kategórií a podkategórií, ktoré zohľadňujú hlavné faktory ovplyvňujúce ich efektívnosť. Hodnotenie prebieha podľa škály:

- **2 body** – UAV je ideálny pre dané použitie, efektívny a spoľahlivý.
- **1 bod** – UAV je použiteľný, ale s určitými obmedzeniami.
- **0 bodov** – UAV je nevhodný pre danú situáciu.

Body sa spočítajú a UAV s vyšším počtom bodov je považovaný za vhodnejší.

Kategória	Možnosť	Multikoptér	UAV s pevným krídlom
1. Typ činnosti	Mapovanie	2	2
	Monitorovanie	2	2
	Vyhľadávanie a záchrana (SAR)	2	1
	Priemyselné inšpekcie	2	2
	Poľnohospodárstvo	2	2
	Videografia	2	1
2. Prostredie	Polia	2	2
	Lesy	1	2
	Veľké miesta	2	0
	Úzke uličky	2	0
	Stavby / vysoké budovy	2	0
	Skalnaté terény	2	1
	Zalesnené oblasti v horách	1	2
	Jazerá, rieky	2	2
	Moria a oceány	2	2
	Z pevnej plochy (štrkové, asfaltové plochy)	2	2
3. Vzlet a pristátie	Vertikálny vzlet a pristátie (VTOL)	2	0
	Možnosť vzletu z obmedzených plôch	2	0
4. Čas letu	< 45 minút	2	1
	45–90 minút	0	2
	> 90 minút	0	0
5. Manévrovateľnosť	Vznášanie sa	2	0
	Kruhový let nad bodom	1	2
	Vysoká presnosť dát (GSD Mapping)	2	1
	Dlhodobé pozorovanie jedného bodu	1	1
	Dážď	1	1
	Vietor	1	2
6. Počasie a klimatické podmienky	Teplota	2	2
	Sneh / zamrznuté podmienky	1	2
	Nízka viditeľnosť / hmla	1	2
	Búrky a blesky	0	0
	Vlhkosť	1	1
7. Presnosť a dostupnosť RTK/PPK	Dostupnosť pre presné geodetické merania RTK/PPK	2	2
	Snímanie bez RTK/PPK (pri nízkej presnosti)	1	1

Obrázok 2 "Bodovací systém"

5.2. Opis UAV zariadení vybraných na analýzu a porovnanie

DJI Mavic 3 Enterprise a senseFly eBee X sú vhodné na mapovanie a monitorovanie vďaka vysokej kvalite snímok a presnému RTK/PPK geolokačnému systému. Pri pátracích a záchranných operáciách má multikoptéra výhodu v schopnosti vznášať sa a rýchlo reagovať, zatiaľ čo eBee X je efektívnejší pri pokrývaní veľkých oblastí. V priemyselných inšpekciách sú oba systémy dobre využiteľné: Mavic 3 lepšie funguje v stiesnených priestoroch, eBee X pri väčších plochách. Pri videografii jednoznačne vedie multikoptéra vďaka možnosti stabilného nátáčania z miesta. V otvorených priestoroch sú obe platformy rovnocenné, no v mestách a úzkych priestoroch má výhodu Mavic 3 Enterprise. V lesoch a horských oblastiach sa naopak lepšie uplatní pevné krídlo. Pri vzlete a pristátí zo stiesnených plôch má prevahu multikoptéra, ktorá zvláda vertikálny štart, zatiaľ čo eBee X potrebuje viac priestoru. V čase letu má eBee X výhodu (až 90 minút oproti 45 minútam pri Mavic 3), čo je dôležité pre rozsiahle misie. V oblasti manévrovateľnosti vyniká multikoptéra možnosťou vznášania sa a presného sledovania bodu, pričom eBee X vykonáva kruhové prelety. Za veterného počasia je stabilnejšie pevné krídlo, ale ani jeden z dronov nie je vhodný na dážď alebo búrky. Oba UAV ponúkajú vysokú pozičnú presnosť vďaka RTK/PPK technológiám. Na základe týchto poznatkov bol vytvorený univerzálny bodovací systém na výber optimálneho drona pre rôzne misie. [9] [8]

5.3. Limitácie systému

Systém navrhnutý na výber vhodného UAV má svoje limitácie, pretože porovnáva iba dve základné koncepcie (multikoptéry a pevné krídlo), čo nemusí pokryť všetky špecifické požiadavky. Určité faktory, ako manévrovateľnosť pri vznášaní sa, vzlet a pristátie, čas letu, užitočné zaťaženie alebo potreba RTK/PPK

presnosti, môžu spôsobiť, že odporúčaný dron nie je vhodný pre konkrétnu misiu. Systém je určený ako pomocný nástroj pre orientáciu, nie ako univerzálne rozhodovacie riešenie.

5.4. Názorne použitie bodovacieho systému

Pre lepšie pochopenie fungovania bodovacieho systému uvádzame názorný príklad jeho využitia v praxi, ktorý ukazuje, ako systém pomáha pri výbere vhodného typu UAV.

Scenár 1. Predstavme si situáciu, kde je potrebné vykonať monitorovanie poľnohospodárskej oblasti. Zákazník požaduje vytvorenie ortofotomapy a NDVI analýzy (Normalized Difference Vegetation Index) pre 300-hektárové pole s mierne zvlneným terénom. Cieľom je získať presné dáta o stave vegetácie, ktoré budú využité na plánovanie zavlažovania a hnojenia. Požiadavky zákazníka: efektívne pokrytie veľkého územia v čo najkratšom čase, základná odolnosť voči miernemu vetru, dlhý čas letu, a presnosť výstupu.

Kategoríe	Možnosť	Multikopter		UAV s pevným krídlom	
		DJI Mavic 3 Enterprise	senseFly eBee X	DJI Mavic 3 Enterprise	senseFly eBee X
1. Typ činnosti	Mapovanie	2	2		
	Monitorovanie	2	2		
	Vyhľadávanie a záchrana (SAR)	2	1		
	Priemyselné inšpekcie	2	2		
	Poľnohospodárstvo	2	2		
2. Prostredie	Videografica	2	1		
	Polia	2	2		
	Lesy	1	2		
	Veľké miesta	2	0		
	Uzke uličky	2	0		
	Stavby / vysoké budovy	2	0		
	Skalnaté terény	2	1		
	Zalesnené oblasti v horách	1	2		
	Jazery, rieky	2	2		
	Moria a oceány	2	2		
3. Vzlet a pristátie	Z pevnej plochy (štrkové, asfaltové plochy)	2	2		
	Vertikálny vzlet a pristátie (VTOL)	2	0		
	Možnosť vzletu z obmedzených plôch	2	0		
4. Čas letu	< 45 minút	2	1		
	45–90 minút	0	2		
	> 90 minút	0	0		
5. Manévrovateľnosť	Vznášanie sa	2	0		
	Kruhový let nad bodom	1	2		
	Vysoká presnosť dát (GSD Mapping)	2	1		
	Dlhodobé pozorovanie jedného bodu	1	1		
6. Počasie a klimatické podmienky	Dažď	1	1		
	Vietor	1	2		
	Teplota	2	2		
	Sneh / zamrznuté podmienky	1	2		
	Nízka viditeľnosť / hmľa	1	2		
	Búrky a blesky	0	0		
	Vlhkosť	1	1		
7. Presnosť a dostupnosť RTK/PPK	Dostupnosť pre presné geodetické merania RTK/PPK	2	2		
	Snímanie bez RTK/PPK (pri nízkej presnosti)	1	1		
		18	20		

Obrázok 3 Názorne použitie bodovacieho systému scenár 1

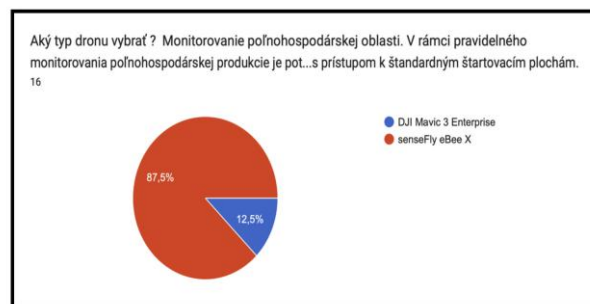
Na základe výsledkov bodovacieho systému možno konštatovať, že senseFly eBee X UAV s pevným krídlom je pre túto misiu vhodnejšou voľbou.

5.5. Porovnanie výsledkov s navrhnutého systému s výsledkami formuláru

Na overenie funkčnosti a praktickej použiteľnosti vytvoreného bodovacieho systému bol navrhnutý formulár, ktorý obsahoval 10 konkrétnych prevádzkových situácií. Tento formulár bol následne zaslaný 16 skúseným pilotom dronov, ktorí na základe svojich odborných znalostí a praktických skúseností vybrali najvhodnejší typ UAV pre každú situáciu. Výsledky ich rozhodnutí boli následne porovnané s odporúčaniami navrhnutého bodovacieho systému. Cieľom bolo overiť, či systém dokáže poskytnúť rovnaké odporúčania ako odborníci z praxe, a tým potvrdiť jeho spoľahlivosť a prínos pre používateľov bez hlbších technických znalostí.

5.5.1. Výsledky

Pri porovnaní výsledkov bodovacieho systému s odpoveďami pilotov môžeme na obrázku 4 vidieť, že skúsení piloti dronov vo väčšine prípadov zvolili rovnaký typ UAV, ako odporučil bodovací systém. Menšie percento pilotov však uviedlo, že by v danom scenári bolo možné použiť aj DJI Mavic 3 Enterprise. Čisto teoreticky je to možné, pretože DJI Mavic 3 Enterprise poskytuje dostatočné rozlíšenie pre NDVI analýzy, podporuje RTK pre presné mapovanie a je ľahko ovládateľný. Na rozdiel od senseFly eBee X však nie je schopný pokryť celé 300-hektárové územie v jednom lete kvôli kratšiemu letovému času.



Obrázok 4 Výsledok s formuláru, scenár 1

Ostatných 9 výsledkov získaných prostredníctvom formulára a porovnaných s odporúčaniami „Bodovacieho systému“ sú uvedené v Prílohe A. Tieto porovnania slúžia ako dôkaz funkčnosti systému. Výsledky ukázali, že navrhnutý systém dokáže efektívne a presne hodnotiť vhodnosť UAV v rôznych reálnych prevádzkových scenároch. Zhodnosť výstupov systému s odporúčaniami skúsených pilotov potvrdzuje, že metodika založená na kľúčových prevádzkových parametroch je spoľahlivá a prakticky použiteľná aj pre používateľov bez technických znalostí. Na základe všetkých prípadov v Prílohe A môžeme povedať, že bodovací systém sa ukázal ako správny a prakticky využiteľný. Keď bol rozdiel v bodoch medzi multikoptérou a dronom s pevným krídlom malý, názory pilotov sa niekedy líšili. Pri veľkom bodovom rozdieli (napr. v Scenári 3: 16 vs. 6 bodov) sa však všetci piloti zhodli na rovnakom type UAV. To potvrdzuje, že bodovací systém je spoľahlivý a objektívny.

6. Záver

Cieľom tejto práce bolo porovnanie efektívnosti základných koncepcií UAV vzhľadom na prevádzkové podmienky, hlavne multikoptéra a UAV s pevným krídlom pri rôznych scenároch prevádzky. Ako návrh metodiky výberu typu UAV bol vytvorený „Bodovací systém“, ktorý umožňuje jednoduchý výber vhodného typu UAV aj používateľom bez technických znalostí. Systém je navrhnutý ako univerzálny nástroj na porovnanie akýchkoľvek dronov, ktoré sú veľkostne a koncepcie podobné. Na demonštráciu funkčnosti systému boli vybrané dve populárne koncepcie dronov – multikoptéra DJI Mavic 3 Enterprise a UAV s pevným krídlom senseFly eBee X.

Následovne bol vytvorený „Bodovací systém“, ktorý pri výbere typu UAV zohľadňuje kľúčové prevádzkové faktory, ako sú typ činnosti, letové podmienky, manévrovateľnosť, presnosť a dostupnosť RTK/PPK, prostredie a čas letu. **Hybridné UAV neboli zahrnuté do Bodovacieho systému**, pretože ich

konštrukcia kombinuje vlastnosti multikoptéra aj UAV s pevným krídlom, čo môže skresľovať porovnanie. Cieľom bolo vytvoriť jednoduchý systém založený na dvoch jasne odlíšiteľných koncepciách – multikoptéra a UAV s pevným krídlom. Hybridné drony predstavujú samostatnú kategóriu so špecifickými výhodami aj obmedzeniami (napr. vyššia cena, zložitejšia údržba či špecializované použitie), preto by si vyžadovali osobitné kritériá hodnotenia.

Na overenie funkčnosti a praktickej použiteľnosti vytvoreného „Bodovacieho systému“ bol navrhnutý formulár (overenie správnosti navrhovaného systému), v ktorom boli znázornené 10 konkrétnych prevádzkových situácií. Formulár bol následne zaslaný 16 skúseným pilotom dronov, ktorí mali na základe svojich odborných znalostí a praktických skúseností určiť najvhodnejší typ UAV pre každú situáciu. Následne výsledky boli porovnané s výsledkami navrhnutého „Bodovacieho systému“. Cieľom bolo zistiť, či systém dokáže navrhnúť rovnaký výsledok ako odborníci z praxe, a tým potvrdiť jeho spoľahlivosť a prínos pre používateľov bez technických znalostí.

Dôležité je vedieť, že systém funguje len keď porovnávame dva veľkostne podobné drony. Dôvodom je to, že rôzne kategórie dronov (napríklad mikro UAV vs. veľké priemyselné systémy) majú odlišné technické parametre, výbavu a účel použitia, ktoré sa nedajú spravodlivo porovnať rovnakým súborom univerzálnych kritérií.

Práca zároveň otvára priestor pre ďalší vývoj systému, jeho rozšírenie o ďalšie typy UAV, či zohľadnenie špecifických úloh v rôznych oblastiach. Získané výsledky a navrhnutá metodika môžu slúžiť ako základ pre budúce výskumy a prispieť k širšiemu a efektívnejšiemu využívaniu UAV v praxi.

Referencie

- [1] E. Standard, 2022. [Online]. Available: <https://brlab.gitbook.io/edu-ard/edu.ard-standart/opisanie-1>.
- [2] Aerium, „Návod na ovládanie dronu krok za krokom – naučte sa lietať ako skutoční experti,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.aerium.sk/navod-na-ovladanie-dronu>.
- [3] U. Coach, „Fixed Wing Drones: A Comprehensive Guide for Drone Pilots [New for 2025],“ 2025. [Online]. Available: <https://www.dronepilotgroundschool.com/fixed-wing-drones/>.
- [4] S. N. Link, „Design of a Commercial Hybrid VTOL UAV System,“ 2013. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-013-9900-0>.
- [5] ANO Center SRPN, „History of creation and development of unmanned aerial vehicles,“ 2023. [Online]. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-sozdaniya-i-razvitiya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov>.
- [6] BRLAB, „Drones for inspection of power lines and power line supports,“ 2024. [Online]. Available: <https://brlab.ru/scopes/monitoring-liniy/>.

[7] DRONCENTRUM, „Kvadroptéry vs. hexakoptéry vs. oktokoptéry: Pro a proti,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.droncentrum.cz/kvadroptery-vs-hexakoptery-vs-oktokoptery-pro-a-proti/?action=detail>.

[8] AgEagle, „eBee X Series,“ 2024. [Online]. Available: <https://ageagle.com/drones/ebex/>.

[9] d. Enterprise, „Specs,“ 2024. [Online]. Available: <https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs>.

[10] B. Z. Wenling Li, „An Enhanced, Real-Time, Low-Cost GNSS/INS Integrated Navigation Algorithm and Its Platform Design,“ 2025. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11991159/>.



ANALÝZA GHOST FLIGHTS A MOŽNOSTI RIEŠENIA GRANDFATHER SLOTOV V BUDÚCNOSTI

Martin Loja
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Ján Rostáš
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This thesis deals with the issue of the airport slot system used in Europe and Ghost flights. It describes the basic principles of the currently used system, the methods of allocating slots and also brings proposals for its improvement in the future. The analysis of this thesis consists of a comparison of allocated slots at two airports in Europe during the winter season at the turn of the years 2022/23 and the winter season at the turn of the years 2024/25. The thesis also discusses the issue of Ghost flights and their connection with the airport slot system. Therefore, the thesis also defines measures to preserve Grandfather slots that were valid during the COVID-19 pandemic. When analyzing Ghost flights, the thesis focuses on the period between 2017 and 2021. The load factor of individual airlines companies was used to identify this type of flight. The final part of the thesis is devoted to the evaluation of the current airport slot system using SWOT analysis. Based on this analysis, the author of the thesis defines his proposals for solving the shortcomings of the currently used airport slot system. The conclusion of this thesis is devoted to the summary of all the knowledge gained within the framework of the topic being processed.

Keywords

Grandfather slots, Ghost flights, Allocation of airport slots, Reform proposals, IATA

1. Úvod

Letecká doprava je najmladší a dynamicky rozvíjajúci sa spôsob dopravy. Je prepojená s mnohými druhmi dopravy a vyžaduje sofistikovanú infraštruktúru a koordinovanosť pre jej efektívne fungovanie. Tento článok sa zameriava na systém letiskových slotov, ktorý by bolo možné nazvať aj ako koordinovanosť leteckej dopravy na letiskách.

Systém slotov je analyzovaný do hĺbky, vrátane vysvetlenia terminológie týkajúcej sa slotov. Je opísané, ako funguje ich pridelovanie, so zameraním na nedostatky systému, na ktoré bolo v minulosti už viac krát mnohými vládami a organizáciami poukázané v rámci diskusií. V roku 2011 bol podaný návrh na revíziu Nariadenia Rady (EHS) č. 95/93 z 18. januára 1993 o spoločných pravidlách pridelovania prevádzkových intervalov na letiskách spoločenstva. Tento návrh nikdy nebol prijatý kvôli odlišným názorom krajín na danú problematiku.

Téma letiskových slotov je v letectve veľmi dôležitá, hlavne v Európe. Európa ma dlhoročné problémy s nedostatočnou infraštruktúrou na letiskách. Tieto problémy sú spojené s neustálym rastom dopytu leteckých spoločností po leteckých slotoch a viedli k viac ako 100 preťaženým letiskám. To je najväčší počet takýchto letísk na jednom kontinente. Prognózy nasvedčujú tomu, že rast dopytu sa má v nasledujúcich rokoch ešte zvýšiť. Preto je dôležité zaoberať sa touto problematikou a prijať potrebné zmeny v systéme, aby sa dosiahla najvyššia možná efektivita systému.

2. Metodika a metódy skúmania

2.1. Charakteristika skúmaného objektu

Primárnym cieľom tohto článku je skúmanie problematiky pridelovania letiskových slotov na dvoch najrušnejších letiskách v Európe, ktoré sú na základe dostupných štatistík spracované a vyhodnotené vrátane návrhov na optimalizáciu funkčnosti celého systému.

2.2. Spôsob získavania údajov a zdrojov

Samotnému spracovaniu a komparácii jednotlivých informačných zdrojov pochádzajúcich zo štatistických a prevádzkových údajov predchádzal zber relevantných informácií vo forme podrobného štúdia dostupnej literatúry a štatistík vrátane recenzovaných zdrojov zaoberajúcich sa danou problematikou, najmä však oficiálnych stránok leteckých spoločností, letísk a medzinárodných organizácií ICAO a IATA. Zdroje boli zámerne selektované vzhľadom na zvolenú tému bakalárskej práce. Autor práce získal vedomosti a údaje o nedávnej a súčasnej situácii v súvislosti s letiskovými slotmi, ich pridelovaním a využívaním z viacerých zdrojov, ktoré následne posúdil a vyhodnotil.

2.3. Metódy vyhodnotenia výsledkov

V práci bola využitá metóda pozorovania, zberu a syntézy údajov, následne ich komparácie (porovnávanie) a analýzy, teda podrobný rozbor všetkých získaných údajov a platných, resp. najnovších prevádzkových alebo procesných postupov a procedúr. Na záver bola aplikovaná metóda syntézy, ktorej výsledkom je sumarizácia čiastkových výstupov do zmysluplného celku s konkrétnym výsledkom a odporúčaniami

autora. V práci sa nachádzajú aj autorove myšlienky a dedukcie, ktoré na základe odborného vedenia predstavujú tzv. best practice pre posúdenie a návrhy na zlepšenie systému pridelovania a udržiavania letiskových slotov vyplývajúce z monitorovania údajov za roky bezprostredne nasledujúce po pandémii COVID-19, o ktoré sa táto práca opiera.

V práci bola taktiež použitá metóda SWOT analýzy na identifikovanie silných stránok, slabých stránok, príležitostí na zlepšenie a hrozieb letiskového systému slotov. Na základe tejto analýzy boli navrhnuté riešenia slabých stránok a rozvinuté príležitostí na zlepšenie systému.

3. Systém letiskových slotov

Letiská sú základnou infraštruktúrou leteckej dopravy, ktorá umožňuje prepraviť milióny cestujúcich ročne. S rastúcim počtom letov však súčasný počet letísk a ich kapacita odbavených cestujúcich nestačí. Potrebu zvýšiť kapacitu letiskovej infraštruktúry čiastočne oddialilo Medzinárodné združenie leteckých dopravcov, známe aj pod skratkou IATA, ktoré vytvorilo systém slotov s cieľom maximalizovať využitie existujúcich letísk. V tejto práci sú uvedené základy systému pridelovania slotov, vrátane systému pridelovania slotov na letiskách a porovnania rozdelenia slotov na vybraných letiskách v Európe počas pandémie COVID-19 a v súčasnosti.

Letiskový slot je povolenie pre leteckého prevádzkovateľa využívať celú škálu letiskovej infraštruktúry (vzletové a pristávacie dráhy, terminály, stojiská, atď.) v konkrétnom čase a dni na pristátie alebo vzlet na letisku so zabezpečením jeho komplexného odbavenia. Počet slotov dostupných na letisku závisí od kapacity letiska [1] [2].

Pre jednotlivé letiská sú kapacitné limity determinované prevažne nasledujúcimi kritériami:

- Terminál pre cestujúcich (platí pre odlietajúcich aj prilietajúcich cestujúcich)
- Vzletová a pristávací dráha (resp. systém vzletových a pristávacích dráh)
- Handlingové služby (odbavenie lietadiel na stojiskách)

Sloty sú pridelované v sériách, to znamená, napríklad, skupina aspoň piatich slotov, súčasne v rovnaký deň a čas v týždni, ktoré sú distribuované pravidelne v tej istej plánovacej sezóne. Takže séria slotov by bola napríklad, odletový slot o 9:15 hod. počas najmenej piatich po sebe nasledujúcich pondelkov v letnej sezóne [1] [2] [3].

Na účely koordinácie prevádzkových intervalov sú letiská rozdelené do troch rôznych kategórií:

- **Úroveň 1 (nekoordinované):** Letiská, ktorých kapacita letiskovej infraštruktúry je vo všeobecnosti dostatočná na to, aby vždy spĺňala požiadavky užívateľov letísk [1] [2].
- **Úroveň 2 (plánovanie letových poriadkov s podporou facilitátora):** Letiská, pri ktorých existuje predpoklad na preťaženie počas niektorých častí dňa, týždňa alebo sezóny. Toto preťaženie je možné vyriešiť úpravami

letového poriadku, na ktorých sa vzájomne dohodnú letecké spoločnosti a facilitátor (sprostredkovateľ), ktorý je vymenovaný na zabezpečenie uľahčenia prevádzky leteckých spoločností, ktoré využívajú alebo plánujú využívať letisko. Letecké spoločnosti musia facilitátora informovať o ich plánovaných operáciách a musia byť pripravené na prijatie zmien v prípade, že ich facilitátor navrhne. Týmto zmenami facilitátor predchádza zmene kategórie letiska na úroveň 3. Facilitátor musí byť nestranný, nemôže diskriminovať a jeho konanie musí byť vždy transparentné [1] [2].

- **Úroveň 3 (koordinované):** Letiská, na ktorých poskytovatelia nevybudovali dostatočnú infraštruktúru, kde kapacita infraštruktúry počas určitých časových intervalov nedokáže uspokojiť dopyt, alebo kde pokusy facilitátora o zmenu prevádzkovaných intervalov leteckých spoločností neboli úspešné. Na takýchto letiskách je menovaný koordinátor, ktorý prideluje sloty leteckým spoločnostiam a iným prevádzkovateľom lietadiel, ktorí využívajú alebo plánujú využívať letisko [1] [2].

Súčasný právny predpis o pridelovaní slotov sú stanovené v Nariadení Rady (EHS) č. 95/93. Medzinárodná smernica letiskových slotov (WASG) tiež poskytuje usmernenia o plánovaní a pridelovaní slotov, a snaží sa dosiahnuť jednotný prístup koordinátorov. Koordinátori musia pridelovať a monitorovať sloty neutrálnym, transparentným a nediskriminačným spôsobom [1] [3].

Pri pridelovaní slotov pre osobné a nákladné lety stanovila WASG primárne a sekundárne kritériá, ktorými sa riadia koordinátori.

Na základe počítačových žiadostí leteckých spoločností, by mali koordinátori pri vypracovaní plánu pridelovania slotov pre slotovú komisiu uplatňovať v súlade s koordinačnými parametrami, nasledujúce priority:

- a) Historické sloty - Primárne kritériá, ktoré sú stanovené v smernici WASG, vyžadujú, aby boli sloty najskôr pridelené podľa toho ako boli pridelené v predošlých sezónach. Toto sa označuje ako „historické právo“ alebo „Grandfather Right“. Aby si letecké spoločnosti ponechali sloty podľa tohto pravidla, musia počas sezóny využiť aspoň 80 % z každej série slotov. Toto pravidlo je známe aj pod pojmom „80:20“ alebo „use it or lose it“ a znamená, že pokiaľ letecké spoločnosti budú naďalej každoročne využívať 80 % a viac svojich slotov, zachovajú si svoje sloty „na večnosť“ [1].
- b) Fond slotov (tzv. slot pool) - Po pridelení historických slotov koordinátor stanoví fond slotov vrátane všetkých novovytvorených slotov. Koordinátor bude spracovávať žiadosti nových spoločností, žiadosti etablovaných spoločností a žiadosti o zmeny historických slotov spravodlivo s využitím primárnych a sekundárnych kritérií stanovených v smernici WASG. 50 % zo všetkých slotov obsiahnutých vo fonde pri počítačom pridelení slotov by malo byť pridelených novým spoločnostiam, ktoré majú záujem prevádzkovať služby na danom letisku. Keď sa

rovnováha 50/50 nedosiahne v jednej sezóne, napríklad na letiskách, kde je k dispozícii veľmi obmedzený počet slotov, koordinátor by mal opraviť túto nerovnováhu počas nasledujúcej sezóny, aby sa zabezpečilo, že sloty z fondu sa pridelia spravodlivo tak novým spoločnostiam, ako aj etablovaným spoločnostiam [1].

Keď sa prvýkrát zaviedlo nariadenie a proces prideľovania slotov založený na primárnych a sekundárnych kritériách, dopyt leteckých spoločností po letiskových slotoch bol nižší ako dostupná kapacita na letiskách. Dostupnosť kapacity letísk znamenala, že nové letecké spoločnosti vstupujúce na trh mali príležitosť zabezpečiť si sloty a spoločnosti, ktoré z letísk už lietali mali možnosť zvýšiť počet svojich slotov na letiskách. Dopyt v leteckve odvtedy výrazne vzrástol [4] [5].

Tento rast vytvoril príležitosti pre nové letecké spoločnosti, na vytvorenie nových trás a pridanie destinácií pre cestujúcich a spoločnosti, ktoré využívajú leteckú dopravu. Nárast však znamenal aj to, že kapacita letísk a s ňou aj sloty sa preťažili. To zase sťažilo získanie slotov na najrušnejších letiskách pre nové letecké spoločnosti, ako aj pre spoločnosti, ktoré tam už lietali. Sloty na letiskách v Európe sa čoraz viac prideľujú na základe primárneho kritéria - historického práva, vďaka čomu sú sloty na letiskách do značnej miery statické. V súčasnosti sa približne 92 % slotov na koordinovaných letiskách prideľuje na základe historického práva. Toto percento je ešte vyššie na najrušnejších letiskách, napríklad približne 98 % na londýnskom letisku Gatwick a viac ako 99 % na londýnskom letisku Heathrow. Nie je to len charakteristika letísk v Spojenom kráľovstve, ale je to celosvetový fenomén [3] [5].

4. Analýza rozdelenia slotov na letiskách Európy a porovnanie s obdobím počas pandémie COVID-19

V tejto časti sa bližšie venujeme rozdeleniu slotov na dvoch letiskách v Európe. Pozrieme sa na dopyt po slotoch, ich rozdelenie na základe historického práva a na zmenu rozdelenia slotov v súčasnosti a v sezóne po pandémii COVID-19.

4.1. Letisko London Heathrow

Najskôr sa pozrieme na najrušnejšie letisko v Európe. Letisko Heathrow sa nachádza v meste Londýn v Spojenom kráľovstve. Už viacero rokov po sebe nesie titul "najrušnejšie letisko v Európe", a práve preto je pri hodnotení systému prideľovania slotov veľmi dôležité. Na webovom sídle koordinátora letísk Spojeného kráľovstva sa nám podarilo nájsť podrobné údaje o prideľovaní slotov na rôzne sezóny v rámci posledných troch rokov. Z čias koronakrízy však bola dostupná iba zimná sezóna na prelome roku 2022/23 [6].

Počas zimnej sezóny v roku 2022 bol celkový dopyt po slotoch na letisku Heathrow vo výške 218 766. Počet pridelených slotov bol 193 973, čo predstavuje 88,7 % z celkového dopytu.

V zimnej sezóne 2022/23 bolo jednotlivým spoločnostiam pridelených 1 993 nových slotov, z toho 1 344 slotov predstavujú historické sloty leteckej spoločnosti Aeroflot, ktorá o ne prišla z dôvodu vojny na Ukrajine. 924 slotov bolo pridelených novým a 894 etablovaným leteckým spoločnostiam. Okrem slotov, ktoré boli odobraté spoločnosti Aeroflot a ostatným spoločnostiam

bolo vytvorených 267 nových slotov. Na základe údajov uverejnených na stránke Airport Coordination Limited môžeme vyhodnotiť, že v zimnej sezóne 2022/23 bolo viac ako 99 % slotov pridelených na základe historického práva [7].

Graf číslo 1 zobrazuje rozdelenie slotov medzi 10 leteckých spoločností, ktoré majú na letisku Heathrow najviac slotov. Ako môžeme vidieť, týchto 10 spoločností má pridelených viac ako 75 % z celkového počtu slotov, pričom 51,40 % patrí jednej spoločnosti – British Airways [7].



Graf 1 Rozdelenie slotov na letisku Heathrow medzi spoločnosti podľa počtu slotov W2022/23

Počas zimnej sezóny v roku 2024/25 bol celkový dopyt po slotoch na letisku Heathrow vo výške 221 986. Počet pridelených slotov bol 202 798, čo predstavuje 91,4 % z celkového dopytu.

V zimnej sezóne bolo pridelených 264 nových slotov. Tento počet pozostáva z 224 historických slotov, ktoré stratili spoločnosti LATAM Airlines a Hainan Airlines, a 40 novovytvorených slotov. Tieto sloty boli pridelené novým spoločnostiam. Na základe porovnania zimnej sezóny W2022/23 a zimnej sezóny W2024/25 môžeme vyhodnotiť, že aj napriek navýšeniu kapacity letiska o takmer 10 000 slotov, väčšina týchto slotov išla etablovaným spoločnostiam [8].

Graf číslo 2 zobrazuje rozdelenie slotov medzi 10 leteckých spoločností, ktoré majú na letisku Heathrow najviac slotov. Ako môžeme vidieť, zoznam spoločností sa nezmenil, je totožný so zoznamom leteckých spoločností v zimnej sezóne W2022/23. Stále majú pridelených viac ako 75 % z celkovej kapacity slotov letiska. Okrem toho sa väčšine spoločností ešte podarilo zväčšiť množstvo pridelených slotov. Spoločnosť British Airways dostala v tejto sezóne o 5 253 slotov viac ako v zimnej sezóne W2022/23. Z celkového počtu slotov jej patrí až 51,76 %. Spoločnosť Virgin Atlantic taktiež navýšila svoj počet na 4,56 % [8].



Graf 1 Rozdelenie slotov na letisku Heathrow medzi spoločnosťami podľa počtu slotov W2024/25

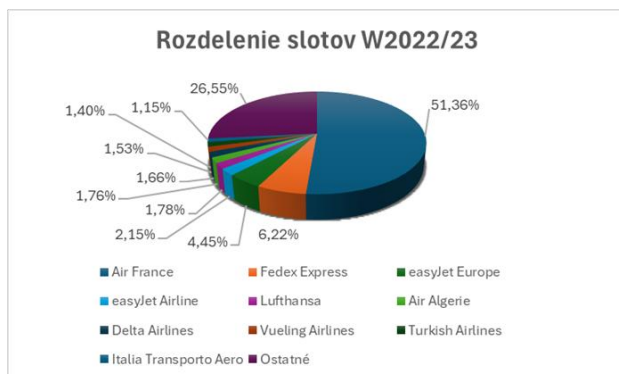
4.2. Letisko Charles de Gaulle v Paríži

Ďalším letiskom, údaje ktorého sme sa rozhodli použiť v rámci našej analýzy, je letisko Charlesa De Gaulle v Paríži, ktoré je považované za tretie najrušnejšie letisko v Európe. Ročne prepraví viac ako 70 miliónov cestujúcich. Na základe týchto dôvodov je aj toto letisko podstatné v rámci analýzy systému slotov. Letiská, ktoré sa nachádzajú vo Francúzsku, zastrešuje koordinátor Cohor, ktorý neposkytuje tak detailné informácie o pridelovaní slotov ako koordinátor letísk v Spojenom kráľovstve. Preto sa pri porovnaní rozdelenia slotov zameriame iba na celkové prerozdelenie slotov medzi zimnými sezónami v období medzi rokmi 2021 a 2025 [9].

Počas zimných sezón v rokoch 2021/22 a 2022/23 bol celkový počet pridelených slotov 174 407 a 174 588.

Medzi zimnou sezónou v roku 2021 a 2022 bolo vytvorených 3 181 slotov, ktoré boli rozdelené medzi nové aj etablované spoločnosti. Presný počet rozdelenia medzi tieto dve skupiny žiaľ v správe koordinátora letiska nie je uvedený [10].

Graf číslo 3 znázorňuje rozdelenie slotov v zimnej sezóne W2022/23. Môžeme vidieť, že tak, ako aj na dvoch predchádzajúcich letiskách, aj tu má tých istých 10 leteckých spoločností skoro 75 % z celkovej kapacity slotov na letisku. Dominantné postavenie na tomto letisku má hlavne spoločnosť Air France, pričom v sezóne W2022/23 jej bolo pridelených 89 668 slotov [10].

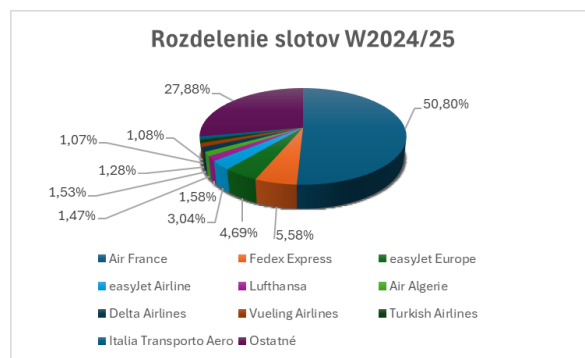


Graf 2 Rozdelenie slotov na letisku CDG medzi spoločnosťami podľa počtu slotov W2022/23

Pri porovnaní rozdelenia slotov sa opäť zameriame iba na celkové prerozdelenie slotov v období medzi zimnou sezónou v roku 2023/24 a 2024/25. Celkový počet pridelených slotov v roku 2023 bol 184 728 a v roku 2024 bol 190 688.

Medzi zimnou sezónou v roku 2023 a 2024 bolo vytvorených 1 831 slotov, ktoré boli rozdelené medzi nové aj etablované spoločnosti. Presný počet rozdelenia slotov medzi tieto dve skupiny taktiež ani za túto zimnú sezónu správa koordinátora letiska neobsahuje [11].

Graf číslo 4 znázorňuje rozdelenie slotov v zimnej sezóne W2024/25. V porovnaní so zimnou sezónou W2022/23 sa kapacita letiska navýšila na 190 688 slotov. I z toho dôvodu klesol percentuálny podiel slotov, ktoré patria jednotlivým leteckým spoločnostiam na tomto letisku. Aj keď celkový percentuálny podiel slotov spoločnosti Air France klesol, počet slotov, ktoré jej boli pridelené vzrástol oproti zimnej sezóne W2022/23 na 96 864. Toto platí i pre ďalšie letecké spoločnosti na tomto letisku, vrátane spoločnosti easyJet [11].



Graf 3 Rozdelenie slotov na letisku CDG medzi spoločnosťami podľa počtu slotov W2024/25

4.3. Zhrnutie a vyhodnotenie analýzy

V našej práci sme vykonali analýzu dvoch veľkých letísk, ktoré sa nachádzajú v Európe. Pri porovnávaní letísk sme sa zamerali na dve zimné sezóny: W2022/23 a W2024/25. Pozorovali sme vývin dopytu po slotoch, zmenu pridelenia slotov spoločnostiam na týchto letiskách a spôsob pridelenia slotov. Dáta na porovnávanie letísk sme získali z oficiálnych stránok koordinátorov vybraných letísk.

Prvý záver, ku ktorému sme dospeli pri analýze informácii je, že správy o rozdelení slotov nemajú definovaný jednotný formát a správy koordinátorov sa od seba líšia. Niektorí koordinátori dokonca ani nezverejňujú tieto správy pre verejnosť. Toto je typické pre národných koordinátorov v Európe ako sú napríklad Nemecko a Holandsko. Európska asociácia pre koordináciu letísk (EUACA) poskytuje na svojej stránke stručný prehľad o rozdelení slotov, ale len na aktuálnu sezónu. Webový portál e-Airportslots.aero je webový systém, ktorý spolupracuje s rôznymi letiskovými koordináčnymi systémami na celom svete prostredníctvom prístupu k ich základným funkciám založených na štandardných správach XML IATA. Pre krajiny ako sú Belgicko, Francúzsko, Nemecko, Maďarsko, Španielsko a Holandsko poskytuje 100 % aktuálne údaje. Všetky ostatné údaje sa získavajú z databázy EUACA a aktualizujú sa raz za noc. Tento portál je však nedostupný pre širokú verejnosť, takže sa nám nepodarilo zistiť, aké údaje sa na ňom nachádzajú.

Analýzou získaných údajov sme taktiež zistili, že spoločný znak týchto letísk je jedna letecká spoločnosť, ktorá má pridelených neprimerane veľa slotov v porovnaní s ostatnými leteckými spoločnosťami. Na letisku Heathrow je to spoločnosť British Airways a na letisku CDG je to Air France. Jedná sa o národných dopravcov konkrétnej krajiny. Pri porovnávaní sezón sme zistili, že aj keď tieto spoločnosti mali pridelené veľké množstvo slotov v zimnej sezóne W2022/23, tak do zimnej sezóny W2024/25 sa im podarilo získať ešte väčšie množstvo slotov, zatiaľ čo niektorým novým leteckým spoločnostiam bola zamietnutá žiadosť o poskytnutie slotov na týchto letiskách.

Pozitívne hodnotíme zväčšenie kapacity letísk medzi týmito dvomi sezónami. Naďalej však dopyt spoločností po slotoch prevyšuje kapacitu, takže v budúcnosti bude potrebné zvážiť alternatívne možnosti na zväčšenie kapacity, ako sú napríklad postavenie nových vzletových a pristávacích dráh, terminálov alebo postavenie nového letiska a presun leteckej dopravy na toto letisko.

Taktiež sme si všimli v správach koordinátora, že vo všetkých prípadoch prideľovania slotov bolo pridelených viac slotov etablovaným spoločnostiam ako novým spoločnostiam. Koordinátor v správe ani neuvádza, na základe akých kritérií prideliť sloty konkrétnym spoločnostiam.

Zo všetkých koordinačných správ, ktoré sa nám podarilo dohľadať, mala najprehľadnejšie správy spoločnosť Airport Coordination Limited (ACL). Táto spoločnosť je najväčší koordinátor letiskových slotov na svete, ktorý spolupracuje so 76 letiskami po celom svete s cieľom zabezpečiť efektívne využitie kapacity a lepši prevádzkový výkon v prospech prevádzkovateľov letísk, leteckých spoločností a cestujúcich. Ich koordinačné správy boli rozpracované do detailov a dali sa v nich nájsť rôzne údaje ako sú dopyt spoločností po slotoch, celkový počet pridelených slotov, počet slotov pridelených na základe historického práva a počet novo pridelených slotov, pričom bolo špecifikované, či boli pridelené etablovaným alebo novým leteckým spoločnostiam. Pri analýze letiska CDG v Paríži koordinátor Cohor neuviedol takéto podrobné informácie vo svojej koordinačnej správe, preto sme museli pri analýze použiť iba celkový počet pridelených slotov v nami definovaných sezónach.

Na záver by sme chceli poukázať na skutočnosť, že nikde nie je definované koľko slotov alebo koľko percent z celkovej kapacity letiska môže byť pridelených jednej leteckej spoločnosti.

5. Návrh prevádzkových a legislatívnych zmien

Je možné, že Grandfather sloty v súčasnosti bránia optimálnemu využívaniu kapacity letiskových slotov, najmä na najrušnejších letiskách. Letecké spoločnosti si veľmi dobre uvedomujú ťažkosti pri získavaní nových slotov na najrušnejších letiskách vzhľadom na kapacitné obmedzenia, ktoré sa objavili. Kvôli tomu sa zdráhajú riskovať stratu slotov na týchto letiskách a prevádzkujú lety, ktoré nie sú ziskové [3].

Ako sme už spomenuli v roku 2011 bol predložený návrh na revíziu Nariadenia Rady (EHS) č. 95/93, ktorým by sa aspoň čiastočne zlepšila situácia na trhu. Tento návrh zostáva v Rade zablokovaný od roku 2013, zatiaľ čo podmienky na trhu, ktoré si

vyžiadali revíziu v roku 2011, pretrvávajú a sú ešte naliehavejšie [12] [13].

Tento návrh zahŕňa zmeny ako napríklad:

- **Zmena definície slotu**

- Súčasná definícia vedie k rôznym výkladom a mala by sa zmeniť tak, aby zdôraznila povinnosť leteckej spoločnosti efektívne využívať povolenie, ktoré jej bolo udelené. V nariadení by sa preto malo jasne uviesť, že slot je povolením aj povinnosťou využívať letiskovú infraštruktúru.
- Zneužívanie slotov a plytvanie sú hlavným problémom letísk v dnešnom preťaženom prostredí, ktorý je potrebné ďalej riešiť prostredníctvom pevného, konzistentného a transparentného sankčného režimu stanoveného v nariadení [12] [13].

- **Zohľadnenie priorít letísk pri procese prideľovania slotov**

- Letiská sú konkurenčné podniky a existujú, aby slúžili cestujúcim a poskytovali im konektivitu s inými krajinami a mestami. Väčšina letísk potrebuje pokryť svoje náklady na rozširovanie infraštruktúry a musí sa zaobísť bez verejného financovania. Pravidlá EÚ o štátnej pomoci umožňujú verejné financovanie len pre menšie regionálne letiská a za prísnych podmienok. Letiská majú preto legitímny záujem na tom, ako sa ich kapacita prideľuje a využíva [12] [13].
- V procese prideľovania slotov by sa mali oveľa viac zohľadňovať strategické ciele letísk a ich regiónov. Tie môžu zahŕňať napríklad:
 - Otváranie leteckých spojení do nových destinácií a trhov.
 - Posilnenie konkurencie leteckých spoločností.
 - Stanovenie priorít a rozvoj konektivity pre miestnu komunitu obsluhou strategicky dôležitých trhov (napr. národné hlavné mestá a dôležité obchodné/vnútorné destinácie cestovného ruchu), uľahčenie prepojení uzlov a zvýšenie konektivity.
 - Plnenie cieľov udržateľnosti letísk [12] [13].

- **Transparentnosť**

- Transparentnosť je nevyhnutný prvok nezávislého koordinačného režimu. Letiská a letecké spoločnosti by mali mať možnosť požiadať koordinátora o vysvetlenie dôvodov pridelenia slotov, konkrétne kritérií, ktoré sa uplatnili pri rozhodovaní, najmä ak bolo potrebné vybrať medzi viacerými žiadosťami o sloty. Je dôležité, aby letiská pochopili, ktoré sekundárne kritériá sa použili na prideľovanie, na akom základe a ako boli tieto sekundárne kritériá v tomto procese vzájomne zvážené. Koordinačné parametre by mali byť jasné a ľahko pochopiteľné.
 - Podľa návrhu z roku 2011 by mal koordinátor predložiť po každom plánovacom období správu o situácii prideľovania slotov. Koordinátor by mal udržiavať voľne prístupnú online databázu zahŕňajúcu historické sloty, žiadosti o sloty, prideľovanie a dostupnosť slotov.
 - Prístup k týmto informáciám umožní letiskám vidieť, ako sú na tom ich sloty pri prideľovaní, a preto podporiť väčšie zváženie strategických priorít letísk v procese prideľovania [12] [13].
- **Pravidlo nového účastníka na trhu**
 - Pravidlo pre nových účastníkov, ako je v súčasnosti navrhnuté, nedáva dostatočný priestor leteckým spoločnostiam, ktoré majú na letisku málo alebo žiadne sloty, aby si na preplnených letiskách vytvorili konkurenčnú základňu. Obmedzením štatútu nového účastníka na dopravcov, ktorí majú menej ako päť slotov v deň, na ktorý žiadajú o slot sú letecké spoločnosti veľmi obmedzené v spôsobe akým môžu rozvíjať svoje služby na danom letisku. Po dosiahnutí nízkeho limitu slotov môže letecká spoločnosť získať ďalšie sloty jedine prostredníctvom žiadostí „iné“, pričom je ich žiadosť umiestnená na koniec poradia podľa priority a súťaží so všetkými ostatnými etablovanými leteckými spoločnosťami.
 - Malo by sa tiež zväziť udelenie vyššej priority žiadosťiam nových účastníkov v procese prideľovania pred žiadosťami o zmenu historických slotov. To by novým účastníkom umožnilo lepší prístup k akejkoľvek dostupnej kapacite bez toho, aby sa neprimerane ohrozili historické práva etablovaných leteckých spoločností.
 - Letecká spoločnosť, ktorá má pridelených viac ako 5 % z celkového počtu slotov na letisku, ktoré sú k dispozícii v daný deň na konkrétnom letisku alebo viac ako 4 % z celkového počtu slotov v letiskovom systéme, už nie je definovaná ako nový účastník. Rast skupín leteckých spoločností a dcérskych leteckých spoločností umožňuje podľa tejto definície dopravcovi patriacemu do skupiny leteckých spoločností, aby sa kvalifikoval na základe štatútu nového účastníka, aj keď jeho materská alebo partnerská letecká spoločnosť už má etablovanú prítomnosť na konkrétnom letisku. To umožňuje skupinám leteckých spoločností, ktoré prevádzkujú viacero značiek leteckých spoločností, teda efektívne fungujú ako jedna spoločnosť, vybudovať si dominantné postavenie využívaním pravidiel, ktoré mali umožniť férovú a efektívnu konkurenciu.
 - Návrh z roku 2011 by zvýšil túto hranicu na 10 % a špecifikoval, že toto pravidlo platí rovnako pre materskú spoločnosť leteckej spoločnosti ako aj iných členov tej istej leteckej spoločnosti, aby sa predišlo zneužívaniu. Je na zváženie či netreba stanoviť podobný prah aj pre letecké aliancie, aj keď na vyššej úrovni [12] [13].
- **Sekundárne obchodovanie so slotmi**
 - Sekundárne obchodovanie so slotmi v súčasnosti prebieha na niektorých letiskách EÚ a môže priniesť výhody, ako napríklad prevod slotov dopravcovi, ktorý ich bude využívať efektívnejšie. Zatiaľ čo návrh z roku 2011 videl sekundárne obchodovanie ako silne pozitívnu perspektívu, táto prax má aj veľa nevýhod. Patrí medzi ne využívanie obmedzenej kapacity letísk na generovanie neočakávaných ziskov pre letecké spoločnosti s malým alebo žiadnym primeraným prínosom pre letisko. Schopnosť obchodovať so slotmi na sekundárnom trhu tiež podnecuje letecké spoločnosti, aby sa bránili rozširovaniu kapacity. Rozšírenie kapacity by znížilo nedostatok slotov a zvýšilo konkurenciu, čím by sa zmenšil dopyt po slotoch etablovanej leteckej spoločnosti a ich hodnota na sekundárnom trhu.
 - Prenájom slotov je ďalšou praxou s potenciálnymi nevýhodami pre letiská. Umožňuje, aby boli sloty jednej leteckej spoločnosti, prenajaté inej leteckej spoločnosti, namiesto toho, aby sa vrátili do fondu. V tomto prípade si pôvodná letecká spoločnosť zachová svoje historické práva až do času, kým nezíska späť slot. Je nevyhnutné, aby sa s nevyužitými slotmi neplytvalo a ani sa nehromadili, ale aby sa namiesto toho vrátili do fondu, aby sa pri procese prideľovania umožnilo identifikovať ich najlepšie využitie.

- Členské štáty by ako také mali mať možnosť povoliť sekundárne obchodovanie s letiskovými slotmi, ak existuje dôkaz, že by to bolo prospešné pre optimálne a konkurenčné využitie kapacity letísk. Malo by to podliehať jasným pravidlám a podmienkam, aby sa predišlo rizikám, ako je potenciálne hromadenie slotov. Prenájom slotov by mal byť zo strany koordinátorov taktiež podrobne kontrolovaný [12] [13].

5.1. SWOT analýza

„SWOT analýza je nástroj strategického plánovania, ktorý slúži na identifikáciu silných a slabých stránok, príležitostí a hrozieb spojených s podnikom, projektom alebo iným cieľom [14].“

V našej práci použijeme túto analýzu na systém letiskových slotov, konkrétne na Grandfather sloty. Pozrieme sa bližšie na silné a slabé stránky tohto systému a následne si popíšeme vlastné návrhy na zlepšenie systému.

Tabuľka 1 SWOT analýza

SWOT analýza	
Silné stránky	Slabé stránky
stabilné plánovanie	statické pridelovanie slotov
kratšie meškania	oligopol etablovaných spoločností
efektívne využitie infraštruktúry letiska	"slot hoarding" a "slot babysitting"
pravidlo "use it or lose it"	nerovnomerné pridelovanie slotov
Príležitosti	Hrozby
vybudovanie novej letiskovej infraštruktúry	pandémia
zmena systému pridelovania slotov	finančná kríza
upraviť systém pridelovania slotov	vojnový konflikt
obmedziť počet grandfather slotov	teroristický útok

Na základe SWOT analýzy sme identifikovali silné stránky systému slotov. Grandfather sloty umožňujú stabilné plánovanie liniek z jednej sezóny do druhej, pretože letecké spoločnosti vedia, že pokiaľ splnia pravidlo 80:20, tak dostanú minimálne rovnaký počet slotov. Na základe porovnania s americkými letiskami môžeme zhodnotiť, že aj keď sú meškania v Európe častejšie vďaka systému slotov sú kratšie. Systém slotov umožňuje efektívne využitie letiskovej kapacity, pretože jeho cieľom nie je vytvoriť nulové meškania, ale alokovať maximálnu kapacitu, pri ktorej meškania zostanú na prijateľnej úrovni. Pravidlo „use it or lose it“ môžu považovať za výhodu hlavné letecké spoločnosti, pretože majú istotu, že aj keď nejaké z ich slotov nevyužijú tak o nich hneď neprídu. To ich motivuje neprevádzkovať Ghost flights, ale radšej let preplánovať.

Statické pridelovanie slotov je jedna zo slabých stránok systému slotov. Na väčšine preplnených koordinovaných letiskách sa dostupná kapacita prideluje pomocou Grandfather slotov. To znamená, že pridelovanie je statické a nové spoločnosti nemajú možnosť vstúpiť na trh. Na tých najväčších letiskách ako sú napríklad Heathrow a CDG v Paríži má dokonca jedna letecká spoločnosť viac ako 50 % celkovej dostupnej kapacity. Takéto postavenie leteckých spoločností výrazne ovplyvňuje konkurenciu. Letecké aliancie, ktoré sú v dnešnej dobe už bežné taktiež výrazne ovplyvňujú konkurenciu na takýchto preplnených letiskách. Pri takomto rozdelení slotov vzniká na trhu situácia, ktorá sa nazýva oligopol. „Oligopol (koncentrovaný) = niekoľko výrobcov má kontrolu nad väčšou časťou ponuky určitého tovaru [15].“ Tieto letecké spoločnosti taktiež využívajú rôzne taktiky, ako napríklad „slot hoarding“ a

„slot babysitting“, aby si svoje sloty zachovali aj keď ich nevyužívajú efektívne. Takéto praktiky bránia vstupu nových spoločností na trh. WASG hovorí, že koordinátori by pri rozdelení slotov z fondu mali rozdeliť sloty v pomere 50:50 medzi novými účastníkmi a etablovanými spoločnosťami. Na základe našej analýzy môžeme zhodnotiť, že v praxi to tak vždy nie je.

Existuje viacero príležitostí na zmenu alebo zlepšenie systému. Najlepšie riešenie na problém preťažených letísk je postavenie novej letiskovej infraštruktúry. To by vyriešilo väčšinu problémov, ktorým čelí systém letiskových slotov. Bohužiaľ takéto riešenie trvá dlho a pri niektorých letiskách to ani nie je možné. Ďalšie riešenie by bolo prestať využívať systém slotov na niektorých letiskách a prejsť na americký systém „first come, first served“. Následne porovnať používanie tohto systému zo systémom slotov na Európskom trhu. Pri tomto návrhu je riziko, že by nastal chaos, keďže by to prinieslo radikálne zmeny oproti súčasnemu systému. Konzervatívnejšie riešenie by bolo prijatie návrhu na upravenie systému slotov, ktorý je súčasne pozastavený. Zmeny z tohto návrhu sme si popísali bližšie v bode 5. Prijatie len niektorých z týchto zmien by pomohlo vyriešiť situáciu na trhu. Posledný návrh, ktorý sme identifikovali pri vytváraní SWOT analýzy bol obmedzenie počtu Grandfather slotov na letisku. Obmedzenie počtu Grandfather slotov by zabránilo vzniku situácií ako na letisku Heathrow a CDG, kde jedna letecká spoločnosť má neprimerane veľa slotov v porovnaní s ostatnými.

Do kategórie hrozby sme uviedli pandémiu, finančnú krízu, vojnový konflikt, teroristický útok. Každá z týchto situácií priniesla so sebou kolaps systému Grandfather slotov. Naposledy to bola pandémia COVID-19, pri ktorej by bez zásahu do pravidiel systému slotov nastala situácia, že by sa prevádzkovali stovky až tisíce Ghost flights za účelom zachovania slotov. Tým chceme povedať, že tento systém je veľmi citlivý na neočakávané zmeny alebo situácie a bez rýchlych zásahov zo strany Európskej komisie a vlád jednotlivých štátov vo svete prestáva plniť svoju funkciu.

6. Záver

Cieľom práce bola analýza súčasného systému letiskových slotov a Ghost flights, ktoré sa vyskytli počas pandémie COVID-19. Na začiatku práce bolo preto dôležité zadefinovať si teoretické východiská danej problematiky. Bližšie sme sa pozreli na to, ako systém letiskových slotov funguje, ako sú rozdelené letiská a na základe akých kritérií funguje pridelovanie letiskových slotov. Následne sme si vybrali koordinované letiská v Európe, na ktorých sme porovnali rozdelenie slotov medzi zimnou sezónou na prelome rokov 2022/23 a zimnou sezónou na prelome rokov 2024/25. Na základe tohto porovnania sme dospeli k záveru, že pridelovanie slotov je skutočne statické, a na tých najviac preťažených letiskách sa uskutočňuje na základe „Grandfather right“, v preklade tzv. historických práv. Na každom z týchto letísk existuje jedna letecká spoločnosť, ktorá má pridelených neprimerane veľa slotov, v porovnaní s ostatnými leteckými spoločnosťami. Preto sme navrhli zmenu, ktorej podstata je v tom, že rovnako ako platí obmedzené pravidlo nového účastníka, tak by mal byť obmedzený aj počet Grandfather slotov, ktoré daná spoločnosť, za účelom zachovania konkurencie, môže mať na letisku pridelených. Sme toho názoru, že letecké spoločnosti zneužívajú súčasný systém,

pretože aj keď slot nevyužívajú efektívne, tak ho do fondu slotov nevrátia, čím neumožnia jeho využitie inými leteckými spoločnosťami.

V práci sme sa pozreli aj na americký systém „first come, first served“. Pri porovnaní letísk, ktoré fungujú na tomto princípe a koordinovaných letísk v Amerike sa zistilo, že na koordinovaných letiskách sa používajú lietadlá s menšou kapacitou. Môže to byť ovplyvnené aj skutočnosťou, že letecké spoločnosti radšej použijú na trase menšie lietadlo, ako sa slotu vzdajú v prospech inej spoločnosti, ktorá by ho využila lepšie.

Organizácia IATA zachováva konzervatívne stanovisko a hovorí, že systém funguje dobre a nie je potrebné ho meniť. Európska komisia vie, že súčasný systém je potrebné upraviť, pretože nefunguje efektívne. V roku 2011 bol predložený návrh na revíziu Nariadenia Rady (EHS) č. 95/93, ktoré upravuje systém slotov v Európskej únii. Tento je zatiaľ v Európskej rade zablokovaný.

Na základe vedeckých zdrojov sme analyzovali problematiku Ghost flights. Zamerali sme sa hlavne na obdobie pandémie COVID-19. Dospeli sme k záveru, že tieto lety sa skutočne môžu vyskytnúť, ak nie je v čase krízy upravené pravidlo o Grandfather slotoch. Tieto lety sme analyzovali na základe štúdie zverejnenej v denníku Transport Policy, kde sa zamerali na koeficient zaťaženia letov v Európe, ktoré sú medzi jednotlivými spoločnosťami veľmi heterogénne. Počas pandémie COVID-19 to boli konkrétne nízko-nákladoví dopravcovia, ktorí prevádzkovali Ghost flights (tzv. abnormálne lety). Najviac týchto letov sa vyskytlo v období marec až máj 2020, teda na začiatku pandémie COVID-19. Vďaka opatreniam Európskej komisie sa následne počet týchto letov minimalizoval.

Systém Grandfather slotov má aj určité výhody, napríklad, dáva istotu leteckým spoločnostiam pri plánovaní liniek a nenúti spoločnosti prevádzkovať Ghost flights. Ak letecká spoločnosť predpokladá, že nenaplní kapacitu lietadla, môže let zrušiť alebo preplánovať. Pravidlo 80:20 umožňuje leteckým spoločnostiam zrušiť tieto lety a stále si zachovať rovnaký počet slotov do nasledujúcej sezóny. Jediná podmienka je, že musia využiť 80 % im pridelených slotov.

Na záver by sme chceli podotknúť, že v súčasnosti neexistuje lepšia alternatíva ako je využívanie systému letiskových slotov. Preto je potrebné do budúcnosti tento systém vylepšiť, aby sa dosiahla jeho maximálna efektívnosť. Návrh na revíziu Nariadenia Rady (EHS) č. 95/93 by mal byť jednoznačne prijatý a doplnený o limit na maximálny počet Grandfather slotov pre jednu spoločnosť na jednom letisku. Taktiež by do návrhu mali byť zahrnuté požiadavky na koordinátorov a obsah koordináčnych správ, ktoré sme spomenuli v bode 5. Ak je to možné, letiská by sa mali snažiť postaviť novú infraštruktúru, pretože každé riešenie vyplývajúce z návrhu na revíziu Nariadenia Rady (EHS) č. 95/93 bude len dočasné a bez nových terminálov a vzletových a pristávacích dráh sa dnešná situácia v budúcnosti zopakuje. Všetky prognózy sa zhodujú na tom, že objemy leteckej prepravy budú v nasledujúcich rokoch exponenciálne narastať a je nevyhnutné sa touto problematikou zaoberať na globálnej úrovni.

Referencie

- [1] ACI, IATA, WACG, „IATA,“ 01. 04. 2024. [Online]. Dostupné: <https://www.iata.org/en/programs/ops-infra/slots/slot-guidelines/>. [Cit. 15. 02. 2025].
- [2] Eur-lex, „Eur-lex,“ 14. 12. 2024. [Online]. Dostupné: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/allocation-of-time-slots-at-european-union-airports.html>. [Cit. 05. 12. 2024].
- [3] Department for Transport, „gov.uk,“ 04. 12. 2023. [Online]. Dostupné: <https://www.gov.uk/government/consultations/airport-slot-allocation-system-reform>. [Cit. 05. 12. 2024].
- [4] J. Kociubiński, „Research Gate,“ 02. 2014. [Online]. Dostupné: https://www.researchgate.net/publication/262372287_Regulatory_Challenges_of_Airport_Slot_Allocation_in_the_European_Union. [Cit. 05. 12. 2024].
- [5] Aviation strategy, „Aviation strategy,“ 11. 1997. [Online]. Dostupné: <https://aviationstrategy.aero/newsletter/Nov-1997/1/Slot-allocation:the-need-to-dump-grandfather>. [Cit. 05. 12. 2024].
- [6] Heathrow, „Heathrow,“ Heathrow, [Online]. Dostupné: <https://www.heathrow.com/latest-news/heathrow--the-uk-s-hub-airport->. [Cit. 14. 01. 2025].
- [7] Airport Coordination Limited, „Airport Coordination Limited,“ 17. 06. 2022. [Online]. Dostupné: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMWE5Yjg2N-TUtNjUwOC02jU3LTg0MjAtY2Y4ZDhkMWFKMmVliiwidCI6ImJhNmYyViLWM1ZWUtNGNiNy04NzFjLWU4YjI0NWQwYjY3YiI9>. [Cit. 15. 01. 2025].
- [8] Airport Coordination Limited, „Airport Coordination Limited,“ 05. 06. 2024. [Online]. Dostupné: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODJjZTVjN-2MtMGY3YS00NDIhLTk4NDQtZWVtODdlMTkwMwY1IiwidCI6ImJhNmYyViLWM1ZWUtNGNiNy04NzFjLWU4YjI0NWQwYjY3YiI9>. [Cit. 17. 01. 2025].
- [9] Statista, „Statista,“ Statista, 09. 04. 2025. [Online]. Dostupné: <https://www.statista.com/statistics/1120665/passenger-traffic-paris-charles-de-gaulle-airport/>. [Cit. 14. 04. 2025].
- [10] Cohor, „Cohor,“ 03. 11. 2022. [Online]. Dostupné: <https://www.cohor.org/wp-content/uploads/2022/12/CDGW22-SOS-WebCohor.pdf>. [Cit. 20. 01. 2025].
- [11] Cohor, „Cohor,“ 2024. [Online]. Dostupné: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMzY3YzY0NTMtY2lyNS00MDUzLTlmNmUtOTlmYWY5YWE5ZDM5IiwidCI6ImQzZmM0MWNiLTE0YzItNDUxOC05MDY1LTk4NDQtZWVtODdlMTkwMwY1IiwidCI6ImJhNmYyViLWM1ZWUtNGNiNy04NzFjLWU4YjI0NWQwYjY3YiI9>. [Cit. 21. 01. 2025].
- [12] ACI Europe, „Airports Council International,“ 01. 2020. [Online]. Dostupné: <https://www.aci-europe.org/downloads/resources/ACI%20EUROPE%20POSITION%20PAPER%20ON%20AIRPORT%20SLOT%20ALLOCATION.pdf>. [Cit. 15. 03. 2025].

[13] ACI Europe, „Airports Council International,“ 03. 2022. [Online]. Dostupné: https://aci-europe.org/downloads/resources/ACI%20EUROPE%20Slots%20Position%20Paper%20with%20Preface%20March%202022_final%201.pdf. [Cit. 16. 03. 2025].

[14] Visibility, „Visibility,“ Visibility, [Online]. Dostupné: <https://visibility.sk/blog/slovník/swot-analyza/>. [Cit. 26. 03. 2025].

[15] Euroekonóm, „Euroekonóm,“ Euroekonóm, 31. 07. 2015. [Online]. Dostupné: <https://www.euroekonom.sk/trhovy-mechanismus-a-nedokonala-konkurencia/>. [Cit. 23. 03. 2025].



URBAN AIR MOBILITY AKO ĎALŠIA DIMENZIA DOPRAVY V MESTÁCH

Artúr Malaník

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Andrej Novák

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This thesis analyzes Urban Air Mobility (UAM) as an innovative solution to urban transport challenges in the EU, focusing on technologies, infrastructure, regulations, and benefits for transport and logistics. UAM, utilizing eVTOL aircraft, can reduce traffic congestion, create jobs, and lower CO₂ emissions. In the EU, countries like France and Germany lead in infrastructure development and certification of models like Volocopter VoloCity. UAM could generate 90,000 jobs and a market value of 4.2 billion EUR by 2030, while cutting emissions by up to 52% per passenger-kilometer. In logistics, it shortens delivery times to 15–30 minutes and reduces costs by 20–30%. Mathematical modeling estimates UAM adoption at 0.5–2% of trips in London could save 31–124 minutes annually per driver. Challenges include high vertiport costs (500,000–2 million EUR), regulatory harmonization, and public safety concerns. Recommendations include infrastructure investments, unified regulations, and public campaigns to enhance acceptance.

Keywords

Urban Air Mobility, eVTOL, vertipots, traffic congestion, logistics

1. Úvod

Urban Air Mobility (UAM) predstavuje prelomový koncept v doprave, ktorý využíva elektrické lietadlá s vertikálnym vzletom a pristátím (eVTOL) na prepravu osôb a tovarov v mestskom a prímestskom prostredí. V čase, keď európske mestá zápasia s chronickými dopravnými zápchami, znečistením ovzdušia a preťaženou cestnou infraštruktúrou, UAM ponúka rýchlu, efektívnu a environmentálne udržateľnú alternatívu k tradičným dopravným prostriedkom, ako sú automobily, autobusy či vrtuľníky. Napríklad cesta z letiska do centra mesta, ktorá autom trvá 60 minút, môže byť s eVTOL lietadlom skrátená na 15 minút, ako ukázali testy v Paríži počas Olympiády 2024. Okrem prepravy cestujúcich má UAM obrovský potenciál v logistike, kde môže radikálne zmeniť doručovanie balíkov, podporiť e-commerce a zefektívniť dodávateľské reťazce.[5]

Cieľom tejto bakalárskej práce je poskytnúť komplexnú analýzu zavedenia UAM na globálnej úrovni a v krajinách Európskej únie, so zameraním na technologické, infraštruktúrne, regulačné, ekonomické, environmentálne a sociálne aspekty. Práca skúma schopnosť UAM zmierniť dopravné kongescie, skrátiť cestovné časy a transformovať logistiku, podložené prípadovými štúdiami z Paríža a Mníchova a matematickým modelovaním vplyvu UAM na dopravu v Londýne. Osobitná pozornosť je venovaná ekonomickým prínosom, ako je tvorba 90 000 pracovných miest do roku 2030, a environmentálnym výhodám, vrátane zníženia emisií CO₂ až o 52 % na cestujúceho-kilometer. Práca identifikuje hlavné výzvy, ako sú vysoké náklady na vertiporty (500 000 – 2 milióny EUR), regulačná fragmentácia a verejné obavy o bezpečnosť (71 % respondentov) a navrhuje stratégie na ich prekonanie.[5][4][1]

Práca je rozdelená do štyroch hlavných častí. Prvá časť analyzuje technológie a infraštruktúru UAM, vrátane typov eVTOL lietadiel a systémov riadenia letovej prevádzky (UATM). Druhá časť hodnotí ekonomické a environmentálne prínosy, s dôrazom na

trhový potenciál a zníženie emisií. Tretia časť skúma vplyv UAM na dopravné kongescie a logistiku, podložené prípadovými štúdiami a matematickým modelovaním. Štvrtá časť sumarizuje výzvy a odporúčania pre budúci rozvoj UAM v EÚ.

2. Metodika a metódy skúmania

Výskum kombinuje kvalitatívne a kvantitatívne metódy, aby poskytol komplexný pohľad na UAM. Kvalitatívna analýza zahŕňa prehľad odbornej literatúry a priemyselných správ od renomovaných zdrojov, ako sú Technavio, Fortune Business Insights, NASA a EASA. Tieto zdroje poskytujú údaje o technológiách eVTOL, infraštruktúre vertiportov, regulačných rámcov a spoločenskej akceptácii. Zapojenie do projektov EÚ, ako je CORUS-XUAM podporovaný EUROCONTROL, umožňuje pochopenie praktických aspektov integrácie UAM do vzdušného priestoru.[5][2][4][1]

Kvantitatívna analýza využíva matematické modelovanie na odhad vplyvu UAM na dopravné kongescie. Použité metódy zahŕňajú:

- **Extrapoláciu trendov:** Na základe historických dát od INRIX a TfL sa odhaduje vývoj dopravných kongescií a počtu ciest v Londýne do roku 2025.
- **Tvorbu scenárov:** Modeluje tri úrovne adopcie UAM (0,5 %, 1 %, 2 %) a ich vplyv na zníženie času stráveného v zápchach.
- **Teóriu hier:** Analyzuje rozhodovanie aktérov (vlády, prevádzkovatelia, verejnosť) pri zavádzaní UAM.[3][6]

Prípadové štúdie z Paríža a Mníchova ilustrujú reálne aplikácie UAM, vrátane testov počas Olympiády 2024 a pilotných projektov v Bavorsku. Komparatívna analýza infraštruktúry a certifikácie eVTOL v krajinách EÚ (Nemecko, Francúzsko,

východná Európa) identifikuje lídrov a oblasti na zlepšenie. Dáta sú čerpané z dôveryhodných zdrojov, ako sú EASA, NASA a TfL, čím je zabezpečená spoľahlivosť analýzy.[1][2][4][5][6]

3. Výsledky

3.1. Technológie a dopravné prostriedky UAM

UAM využíva eVTOL lietadlá, ktoré kombinujú elektrické pohony, autonómne systémy a pokročilú avioniku na zabezpečenie bezpečnej a efektívnej prepravy. Tieto lietadlá sa delia na tri hlavné kategórie, každá s unikátnymi vlastnosťami:

- **Multikoptéry:** Vybavené 4 – 8 rotormi, ponúkajú vysokú stabilitu a manévrovateľnosť na krátke vzdialenosti (do 50 km). Príkladom je EHang 216, testovaný v Číne a Barcelone, s doletom 35 km, kapacitou 2 cestujúcich a nosnosťou 5 kg. Sú ideálne pre doručovanie na poslednú míľu, ako sú balíky či zdravotnícke pomôcky, s prevádzkovými nákladmi nižšími ako u tradičných dodávok.
- **Lift + cruise:** Kombinujú vertikálne rotory na vzlet/pristátie a krídla na horizontálny let, čím dosahujú dolet až 240 km. Joby S4, vyvíjaný Joby Aviation, má kapacitu 4 cestujúcich, rýchlosť 320 km/h a dolet 240 km. Je vhodný na letiskové transfery a prímestské trasy, napr. centrum–letisko za 15 minút oproti 60 minútam autom.
- **Vektorový ťah:** Využívajú otočné motory pre vzlet a let, s doletom do 300 km. Lilium Jet ponúka kapacitu 5 cestujúcich, rýchlosť 300 km/h a je navrhnutý na regionálne spojenia, ako sú trasy medzi mestami, skrátujúc čas až o 50 % oproti autám.[2][5]

Technické špecifikácie eVTOL zahŕňajú batérie s hustotou 230–260 Wh/kg, umožňujúce efektívnu prevádzku, a autonómne systémy s detekciou prekážok, ktoré zvyšujú bezpečnosť. V porovnaní s vrtuľníkmi sú eVTOL tichšie (65 dB vs. 90 dB) a lacnejšie (300–400 USD/hodina vs. 500–1000 USD/hodina), no vyžadujú špecializovanú infraštruktúru, ako sú vertiporty.[2][5]

Tabuľka 1: Porovnanie vybraných eVTOL modelov

Model	Dolet [km]	Kapacita [osoby]	Použitie
EHang 216	35	2	Doručovanie
Joby S4	240	4	Air taxi
Lilium Jet	300	5	Air metro

3.2. Infraštruktúra UAM

Infraštruktúra je kľúčová pre úspech UAM a zahŕňa vertiporty, nabíjacie stanice a systémy riadenia letovej prevádzky (UATM). Vertiporty sú špecializované plochy pre štart, pristátie a nabíjanie eVTOL, často umiestnené na strechách budov, pri dopravných uzloch alebo v menej obývaných oblastiach, aby minimalizovali hluk. Typický vertiport obsahuje pristávacie plochy, rýchlonabíjacie stanice (nabitie za < 5 minút), čakacie

priestory a riadiace systémy. Odhaduje sa, že metropolitná oblasť potrebuje ~200 vertiportov pre air metro služby a hustejšiu sieť menších vertistopov pre air taxi. Náklady na vertiport sa pohybujú od 500 000 do 2 miliónov EUR, v závislosti od veľkosti a polohy, s ročnými prevádzkovými nákladmi 10 000–500 000 USD.[5]

Integrácia vertiportov do mestskej infraštruktúry je výzvou. Koordinácia s mestskými plánovačmi je nevyhnutná, aby vertiporty dopĺňali existujúce dopravné siete, ako metro alebo železnice. Napríklad Paríž plánuje vertiporty prepojené s metrom, čím minimalizuje potrebu áut na prístup. UATM systémy sú navrhnuté na správu hustých letov pod 500 stôp, integrujú tradičné riadenie letov (ATM) s technológiami ako GPS, radar, AI a bezpečné dátové linky. Kľúčové komponenty zahŕňajú digitálne plánovanie letov, monitorovanie v reálnom čase a detekciu kolízií, čím sa zvyšuje bezpečnosť a efektivita.[2][5]

V EÚ vedú Nemecko a Francúzsko v rozvoji infraštruktúry. Nemecko testuje vertiporty v Mníchove a Stuttgarte pre Volocopter VoloCity, zatiaľ čo Francúzsko buduje sieť v Paríži, podporenú testami počas Olympiády 2024. Španielsko testuje drony v Barcelone a eVTOL v Benidorme. Krajiny východnej Európy, ako Poľsko či Česko, sú v počiatočných fázach, zapojené do projektov ako CORUS-XUAM, ktorý testuje UATM v reálnych podmienkach. Tieto iniciatívy naznačujú, že aj menej rozvinuté krajiny môžu dobehnúť lídrov pri pokračujúcej podpore.[2][5]

3.3. Certifikácia eVTOL v EÚ

Certifikácia eVTOL lietadiel je pod dohľadom Európskej agentúry pre bezpečnosť letectva (EASA), ktorá vydala v roku 2019 *Special Condition VTOL*, prvý globálny rámec pre eVTOL. Tento dokument stanovuje prísne požiadavky na bezpečnosť, stabilitu a núdzové pristátie. Certifikačný proces zahŕňa:

1. **Predbežné posúdenie:** Výrobca predkladá dizajn a technické detaily na posúdenie.
2. **Testovanie:** Lietadlá prechádzajú testami výkonu, spoľahlivosti a bezpečnosti.
3. **Dokumentácia:** Úplná technická dokumentácia, vrátane manuálov pre prevádzku a údržbu.
4. **Schválenie:** Po úspešných testoch EASA vydá typovú certifikáciu.

Firmy ako Volocopter a Lilium sú v pokročilých fázach, s očakávanou certifikáciou do konca 2025. Aktuálne modely zahŕňajú:

- **Volocopter VoloCity:** 2 cestujúci, dolet 35 km, 110 km/h, pre air taxi služby.
- **Lilium Jet:** 5 cestujúcich, 300 km, 300 km/h, pre regionálne trasy.
- **AutoFlight Prosperity I:** 4 cestujúci, 250 km, pre mestskú/prímestskú prepravu.

Tieto modely pokrývajú široké spektrum od krátkych letov po regionálne spojenia, signalizujúc blížiaci sa komerčný rozvoj UAM v EÚ.[1]

3.4. Ekonomické a environmentálne prínosy

UAM prináša značné ekonomické a environmentálne výhody, ktoré podporujú ciele EÚ pre udržateľnú dopravu a hospodársky rast.

3.4.1. Ekonomický potenciál

UAM predstavuje významnú ekonomickú príležitosť, s odhadovanou trhovou hodnotou 4,2 miliardy EUR do roku 2030, čo tvorí 31 % globálneho trhu. Tento rast je poháňaný investíciami do vývoja eVTOL, výstavby vertiportov a UATM systémov. Očakáva sa vytvorenie 90 000 pracovných miest v oblastiach ako výskum, výroba, prevádzka a údržba. Napríklad Airbus vo Francúzsku plánuje 3 000 pracovných miest do 2028, zatiaľ čo Nemecko podporuje Volocopter, čím stimuluje malé a stredné podniky v leteckom sektore.

Krajiny ako Francúzsko a Nemecko profitujú z prvenstva v testovaní, no východná Európa zaostáva kvôli nízkym investíciám. Koordinovaný prístup EÚ je nevyhnutný na rovnomerné rozloženie prínosov. UAM zvyšuje produktivitu skrátením cestovných časov – napr. cesta z letiska do centra Paríža (60 minút autom) trvá 15 minút, čo zlepšuje efektivitu pracovnej sily. Stimuluje aj inovácie v batériách, autonómnych systémoch a UATM, posilňujúc konkurencieschopnosť EÚ.[5]

3.4.2. Zníženie emisií

UAM prispieva k cieľom EÚ – zníženie emisií o 55 % do 2030 a klimatická neutralita do 2050. eVTOL lietadlá produkujú nulové priame emisie CO₂, na rozdiel od áut (4,7 t CO₂ ročne). Podľa NASA eVTOL s 3 cestujúcimi na trasách nad 35 km znižujú emisie o 52 % na cestujúceho-kilometer oproti benzínovým autám a o 28 % oproti elektromobilom pri priemernej elektrickej sieti. V EÚ, kde obnoviteľné zdroje (veterná, solárna energia) rastú, sú úspory ešte vyššie. Nahradenie 1 % jazd autami v Londýne by mohlo znížiť emisie o tisíce ton ročne.

Hluk eVTOL (65 dB) je porovnateľný s konverzáciou, oproti 90 dB vrtuľníkov, čím zlepšuje kvalitu života. Batérie eVTOL majú recyklačný podiel nad 90 %, znižujúc environmentálnu záťaž výroby a likvidácie.[4]

3.5. Vplyv na dopravné kongescie

Dopravné kongescie sú hlavným problémom európskych miest, spôsobujúc časové straty, vyššie emisie a ekonomické škody. UAM presúva časť dopravy do vzdušného priestoru, čím odľahčuje cesty.

3.5.1. Redukcia cestnej premávky

UAM môže znížiť počet áut na cestách, najmä na zaťažených trasách, ako sú letiskové transfery. Odhaduje sa, že v mestách ako Londýn či Paríž by UAM mohlo do 2030 zachytiť 1 – 5 % ciest, čo zníži kongescie o 5 – 10 % v špičkách. V Mníchove testy Volocopter ukázali, že aj malý počet letov znižuje premávku na trase centrum–letisko. Integrácia s verejnou dopravou (vertiporty pri metro/železničiach) ďalej znižuje závislosť od áut, ako ukazuje plán Paríža.[2][5]

3.5.2. Kapacita eVTOL lietadiel

Väčšina eVTOL má kapacitu 2 – 5 cestujúcich, s doletom 35 – 300 km. Napríklad Volocopter VoloCity (2 cestujúci, 35 km) je ideálny na krátke lety, zatiaľ čo Lilium Jet (5 cestujúcich, 300 km) obsluhuje regionálne trasy. Hoci kapacita je nižšia ako u autobusov, výhodou je vysoká frekvencia letov. Jeden vertiport obsluhuje 10 letov/hodinu, čo pri 4-miestnom lietadle znamená 480 cestujúcich denne. Sieť 10 vertiportov v Paríži by mohla prepraviť 4 800 – 10 000 cestujúcich denne, nahrádzajúc značný počet jazd autom.[1][5]

3.5.3. Prípadové štúdie

- **Paríž:** Počas Olympiády 2024 Volocopter a Airbus testovali lety z letiska Charlesa de Gaulla do centra, skracujúc čas z 60 na 15 minút. Sieť 10 vertiportov obsluhovala 1 200 letov denne, znižujúc dopravu o 5 – 10 %. Vertiporty pri metro staniach minimalizovali prístupové cesty autom.[5]
- **Mníchov:** Testy Volocopter na letisku a v rámci iniciatívy Urban Air Mobility Ingolstadt ukázali zníženie kongescií o 3 – 5 % s 1 000 letmi denne. Trasa centrum–letisko (45 – 60 minút autom) trvala 10 minút. Plánovaná sieť vertiportov by mohla prepraviť desaťtisíce cestujúcich mesačne.[2]

3.6. Logistické aplikácie

UAM mení logistiku pomocou dronov a nákladných eVTOL, ponúkajúc rýchle, lacné a udržateľné doručovanie.

3.6.1. Drony na poslednú míľu

Drony, ako EHang 216 (5 kg, 16 km), sú ideálne na doručovanie malých zásielok (jedlo, lieky) v mestách. Vyhýbajú sa zápcham, doručujú za 15 – 30 minút oproti hodinám autom. Testy v Barcelone ukázali 70 % úsporu času pri zásobovaní nemocníc. Drony využívajú GPS, senzory a AI, zabezpečujúc bezpečnosť a nulové emisie.[2][5]

3.6.2. Nákladné eVTOL

Lietadlá ako VoloDrone (200 kg, 40 km) a Joby Aviation (100 kg, 50 km) obsluhujú regionálne distribúcie, napr. zásoby medzi skladmi alebo urgentné dodávky. Ich modulárny dizajn umožňuje prepravu rôznych tovarov, operujúc z vertiportov na strechách skladov. Náklady sú o 20 – 30 % nižšie ako u tradičných dodávok.[2][5]

3.6.3. Autonómne systémy a UATM

UATM koordinuje husté lety pomocou AI, GPS a radarov, minimalizujúc kolízie. Autonómne systémy, ako u EHang 216, optimalizujú trasy a znižujú spotrebu. Tieto technológie umožňujú škálovanie, kde jeden systém riadi stovky letov, zvyšujúc efektivitu logistiky.[2]

3.6.4. Prínosy pre e-commerce

UAM skracuje dodacie lehoty na 15 – 30 minút, umožňujúc doručenie v ten istý deň. Znižuje náklady o 20 – 30 %, eliminujúc veľké sklady v centrách. Environmentálne výhody (nulové emisie, hluk 65 dB) podporujú udržateľnosť. UAM obsluhuje aj odľahlé oblasti, zlepšujúc dostupnosť e-commerce.[2][4][5]

3.7. Modelovanie vplyvu UAM na dopravné kongescie

Matematické modelovanie analyzuje potenciál UAM znížiť kongescie v Londýne, kde vodiči strávia v zápchach značný čas (101 hodín v 2024).[3]

3.7.1. Extrapolácia trendov

Na základe dát INRIX (80 hodín v 2022, 99 v 2023, 101 v 2024) a 2 % ročného nárastu sa odhaduje 103 hodiny v 2025. Tfl uvádza 28,4 milióna denných ciest v 2023, z toho 9,75 milióna autom (34,3 %). Pri 1 % ročnom náraste:

- 2025: $28,4 \times (1,01)^2 \approx 28,98$ milióna ciest.
- Cesty autom: $0,343 \times 28,98 \approx 9,95$ milióna denne.

[3][6]

3.7.2. Tvorba scenárov

Tri scenáre modelujú adopciu UAM (0,5 %, 1 %, 2 % ciest) a ich vplyv:

- **Pesimistický (0,5 %):** 49 750 ciest UAM denne, 0,5 % redukcia áut, úspora 0,515 hodiny (31 minút) ročne.
- **Základný (1 %):** 99 500 ciest, 1 % redukcia, úspora 1,03 hodiny (62 minút).
- **Optimistický (2 %):** 199 000 ciest, 2 % redukcia, úspora 2,06 hodiny (124 minút).[6]

Tabuľka 2: Scenáre adopcie UAM

Scenár	% Ciest	UAM Cesty (tis.)	Redukcia Áut (%)	Úspora (hod./rok)
Pesimistický	0,5 %	49,75	0,5 %	0,52 (31 min)
Základný	1 %	99,5	1 %	1,03 (62 min)
Optimistický	2 %	199	2 %	2,06 (124 min)

Zdroj: [6][3][2]

3.7.3. Teória hier

Teória hier analyzuje rozhodovanie aktérov:

- **Vlády:** Investujú do vertiportov (500 000 – 2 milióny EUR) a regulácií, ak očakávajú prínosy (zníženie emisií,

pracovné miesta). Stratégiou sú dotácie a regulačné rámce.

- **Prevádzkovatelia:** Firmy ako Volocopter investujú, ak sú regulácie jasné a verejnosť UAM akceptuje. Testujú technológie (Paríž, Mníchov) a spolupracujú s vládami.
- **Verejnosť:** Prijíma UAM, ak je bezpečný a cenovo dostupný, no obavy o bezpečnosť (71 %) a hluk brzdia adopciu.

Rovnováha závisí od koordinácie – dotácie na vertiporty znižujú riziko prevádzkovateľov, lacné lety zvyšujú akceptáciu verejnosti. Bez koordinácie zostane adopcia nízka.[1][2][5]

4. Záver

Mestská letecká mobilita (UAM) má potenciál zásadne zmeniť dopravu a logistiku v EÚ. Matematické modelovanie odhaduje, že pri adopcii 0,5 – 2 % ciest v Londýne UAM ušetrí 31–124 minút ročne na vodiča, zníži kongescie o 0,5 – 2 %. Ekonomicky vytvorí 90 000 pracovných miest a trh v hodnote 4,2 miliardy EUR do 2030. Environmentálne zníži emisie CO₂ až o 52 % na cestujúceho-kilometer pre cesty nad 35 km, podporujúc ciele EÚ pre klimatickú neutralitu do 2050. V logistike skracuje dodacie lehoty na 15 – 30 minút a znižuje náklady o 20 – 30 %, posilňujúc e-commerce a zdravotnícke dodávky.[4][5][6]

Hlavné výzvy zahŕňajú:

- **Finančné:** Vysoké náklady na vertiporty (500 000 – 2 milióny EUR).
- **Regulačné:** Potreba harmonizovaných štandardov EASA pre eVTOL.
- **Sociálne:** Verejné obavy o bezpečnosť (71 %) a hluk (64 %), hoci eVTOL produkujú 65 dB oproti 90 dB vrtuľníkov.
- **Infraštruktúrne:** Prístupové cesty k vertiportom môžu zvýšiť dopravu (Mníchov: +0,27 % km), ak nie sú integrované s verejnou dopravou.[1][2][4][5]

Odporúčania:

1. **Investície do infraštruktúry:** EÚ a štáty by mali financovať vertiporty a UATM, aby zabezpečili škálovateľnosť.
2. **Jednotné regulácie:** EASA by mala urýchliť certifikáciu eVTOL (Volocopter, Lilium) jednotnými štandardmi.
3. **Vzdelávacie kampane:** Informovať verejnosť o prínosoch (zníženie emisií, úspora času) na zmiernenie obáv.
4. **Integrácia s dopravou:** Vertiporty pri metro/železničiach na minimalizáciu áut.
5. **Pilotné projekty:** Rozšíriť testy (Paríž, Mníchov) na získanie dát pre optimalizáciu.

Budúci výskum by mal:

- Zdokonaľiť dopravné modely zohľadňujúce dynamiku tokov a správanie cestujúcich.
- Analyzovať dlhodobé ekonomické dopady a náklady v rôznych scenároch.
- Preskúmať dostupnosť UAM pre nízkoпрijmové skupiny a osoby so zníženou pohyblivosťou.
- Sledovať technologický vývoj batérií a autonómnych systémov.

UAM predstavuje príležitosť pre udržateľnú, efektívnu dopravu, ktorá zlepší kvalitu života a podporí hospodársky rast. S investíciami, spoluprácou a strategickým plánovaním môže UAM transformovať mestskú mobilitu a logistiku, čím prispeje k udržateľnej budúcnosti EÚ.[1][2][5]

Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 54ŽU-4/2025 "Možnosti využitia umelej inteligencie v študijnom programe letecká doprava pri výučbe pilotov a technikov údržby. (SmartSkyEdu)".

Referencie

- [1] EASA. (2021). *Štúdia o spoločenskej akceptácii mestskej leteckej mobility v Európe*. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/press-releases/easa-publishes-results-first-eu-study-citizens-acceptance-urban>
- [2] Fortune Business Insights. (2025). *Analýza trhu mestskej leteckej mobility*. Dostupné z: <https://www.fortunebusinessinsights.com/urban-air-mobility-uam-market-106344>
- [3] INRIX. (2024). *Globálna dopravná karta*. Dostupné z: <https://inrix.com/scorecard/>
- [4] NASA. (2019). **Environmentálny vplyv eVTOL lietadiel**. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002046/downloads/20190002046.pdf>
- [5] Technavio. (2025). *Prognóza trhu mestskej leteckej mobility v Európe*. Dostupné z: <https://www.technavio.com/report/urban-air-mobility-market-analysis>
- [6] Transport for London. (2023). *Správa o cestovaní v Londýne*. Dostupné z: <https://content.tfl.gov.uk/travel-in-london-2024-annual-overview-acc.pdf>



VYUŽITIE POMOCNÝCH STABILIZAČNÝCH PLÔCH V CIVILNOM LETECTVE

Matej Mareš
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jakub Jackuliak
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The implementation of technological innovations in civil aviation is essential for enhancing the efficiency of flight operations, safety, economic accessibility, and the overall attractiveness of commercial flights. One promising area of development is the application of stabilizing surfaces, specifically canard surfaces, which have historically been used primarily in military aviation technology. This study focuses on the conceptual design of implementing canard stabilizing surfaces on existing commercial aircraft, evaluating their benefits as well as analyzing the advantages and disadvantages of various other configuration solutions currently in use. In the practical part, a detailed analysis is conducted on the design of a stabilizing wing for the reference aircraft, the Airbus A320. This analysis includes analytical calculations of stabilizing characteristics and numerical flow simulations using the computational fluid dynamics (CFD) in the ANSYS FLUENT software environment. The results provide a quantitative assessment of the aerodynamic effects of applying stabilizing surfaces and their potential benefits for civil aviation.

Keywords

Stabilizing wing, Civil aviation, Conceptual design

1. Úvod

Na zabezpečenie bezpečného letu je potrebné lietadlo dodatočne stabilizovať. Stabilizácia je potrebná z toho dôvodu, aby nedochádzalo k náhodným vychýleniam letovej dráhy. Takéto vychýlenia by mohli ohroziť bezpečnosť pasažierov a pilotov na palube lietadla. V posledných desaťročiach sa civilné letectvo neustále vyvíjalo s cieľom zvýšiť efektivitu letov, bezpečnosť cestujúcich, ekonomickú dostupnosť letov a celkovú príťažlivosť komerčných letov. V dôsledku vyšších požiadaviek na optimalizáciu letových charakteristík sú konštruktéri nútení hľadať nové technologické stratégie, aby čo najlepšie využili dostupné zdroje a zároveň znížili prevádzkové náklady. Jedným z možných priestorov na výskum sú stabilizačné plochy.

Zámer bakalárskej práce je teoretická analýza možnosti integrácie rôznych typov vyvažovacích plôch do civilného letectva. Výhody a nevýhody dizajnov stabilizačných plôch, základné rozdelenia, druhov, a taktiež vplyvy pozície týchto krídiel na aerodynamickú stabilitu lietadla počas letu budú preskúmané. Identifikovaním hlavných výhod a nevýhod pomôže ujasniť, či daná oblasť je perspektívna na technologické aj finančné investície pre hlbší rozvoj.

2. Stabilizačné plochy v civilnom letectve

Stabilizačné plochy sú neoddeliteľnou súčasťou konštrukcie každého lietadla a zabezpečujú jeho stabilitu a ovládateľnosť počas všetkých fáz letu. V civilnom letectve zohrávajú dôležitú úlohu, pretože výrazne ovplyvňujú bezpečnosť, komfort cestujúcich a efektivitu letových operácií. Stabilizačné plochy sú navrhnuté tak, aby odolávali rôznym vonkajším vplyvom.

Podľa orientácie rozdeľujeme stabilizačné plochy na horizontálne a vertikálne. Okrem klasických riešení existujú aj alternatívne konfigurácie, ktoré ponúkajú nové možnosti optimalizácie letových charakteristík lietadiel. Moderné trendy v dizajne stabilizačných plôch zahŕňajú použitie pokročilých

materiálov a adaptívnych riadiacich systémov. V nasledujúcej časti článku budú podrobne rozobraté jednotlivé typy stabilizačných plôch a ich hlavné charakteristiky.

2.1. Horizontálne stabilizačné plochy

Horizontálne stabilizátory sú základným prvkom na zabezpečenie pozdĺžnej stability lietadla. Spravidla sa nachádzajú v zadnej časti trupu a pôsobia proti momentu, ktorý vzniká v dôsledku vztlaku hlavného krídla. Horizontálny stabilizátor môže byť pevný alebo nastaviteľný. V prípade nastaviteľného stabilizátora je možné meniť jeho uhol nábehu vzhľadom na letové podmienky [1,2,3].

2.2. Vertikálne stabilizačné plochy

Vertikálny stabilizátor, známy aj ako kýl, zaisťuje smerovú stabilitu lietadla. Jeho hlavnou úlohou je zabráňovať nekontrolovanému pohybu lietadla okolo jeho zvislej osi (tzv. „yaw“). Vertikálny stabilizátor zároveň nesie smerové kormidlo, ktoré umožňuje pilotovi aktívne ovládať smer lietadla. Veľkosť a tvar vertikálneho stabilizátora sú optimalizované podľa typu lietadla, jeho hmotnosti a výkonných parametrov [3,4].

2.3. Alternatívne stabilizačné konfigurácie

Okrem tradičných stabilizačných plôch sa v letectve používajú aj alternatívne koncepcie. Kačacie plochy (canardy) sú jednou z alternatív ktorou sa tento článok bude zaoberať najviac. Tieto stabilizačné plochy sú umiestnené pred hlavným krídlom lietadla a môžu výrazne prispieť k zlepšeniu pozdĺžnej stability a manévrovateľnosti. Canardy môžu tiež znížiť zaťaženie hlavného krídla a tým prispieť k optimalizácii celkového aerodynamického výkonu a tým tak lepšie rozložiť váhu samotného lietadla.

Ďalšou alternatívou sú tzv. združené konfigurácie, kde sa kombinujú viaceré stabilizačné prvky. Využívajú sa tzv. V-tail, Λ -tail alebo aj X-tail konfigurácie ktoré spájajú funkcie

horizontálneho aj vertikálneho stabilizátora do jedného celku. Hoci tieto alternatívne riešenia prinášajú množstvo výhod, ich integrácia do civilného letectva je spojená s technickými a certifikačnými výzvami [5,6].

3. Výhody a nevýhody rôznych konfigurácií stabilizačných plôch

Konfigurácia stabilizačných plôch významne ovplyvňuje celkovú aerodynamiku, stabilitu a ovládateľnosť lietadla. Každý typ riešenia so sebou prináša určité výhody, ale aj nevýhody, ktoré je potrebné starostlivo zvážiť pri návrhu lietadiel. Preto si spomenieme aspoň niektoré zo známych a najpoužívanejších konfigurácií.

3.1. Klasická konfigurácia stabilizačných plôch

Ide o najrozšírenejšiu a konštrukčne najjednoduchšiu konfiguráciu stabilizačných plôch. Skladá sa z vertikálnej a horizontálnej časti, pričom horizontálna časť je umiestnená na spodku vertikálnej.

Konfiguráciu rozdeľujeme na dva typy, s deleným stabilizátorom a s plávajúcim stabilizátorom. Delený horizontálny stabilizátor sa skladá z pevnej nepohyblivej časti, ktorá vytvára požadovaný moment, a pohyblivej časti zabezpečujúcej ovládateľnosť lietadla. Plávajúci horizontálny stabilizátor pozostáva z jedného kusu ktorý je pripevnený na otočnom bode na trupe lietadla. Cela časť zabezpečuje ako stabilitu tak aj riadenie lietadla.

Hlavnou výhodou tejto konfigurácie je jej jednoduchosť a nenáročnosť návrhu. Plávajúci výškový stabilizátor má výhodu v tom, že umožňuje riadenie s menšou silou pri vyšších rýchlostiach, čo je dôležité najmä v transonických a nadzvukových režimoch, kde dochádza k zmenám v prúde vzduchu okolo riadiacich plôch. Nevýhodou oboch konfigurácií je, že stabilizátory môžu byť ovplyvnené vírmi motorov umiestnených pred nimi resp. na krídlach. Navyše veľkosť vertikálneho stabilizátora závisí od veľkosti lietadla, čo pri väčších strojoch zvyšuje nároky na jeho konštrukciu [3,4].

3.2. Stabilizačné plochy v T konfigurácii

Takzvaná T-Tail konfigurácia stabilizačných plôch sa nachádza v chvostovej časti lietadla. Je skonštruovaná tak že na vrchnej časti vertikálneho stabilizátora sa nachádzajú horizontálne stabilizačné plochy a z náhľadu pripomínajú písmeno „T“. Tieto stabilizačné plochy nie sú tak konštrukčne náročné, avšak majú väčšiu hmotnosť ako klasická konfigurácia stabilizačných plôch. A to z dôvodu že horizontálna časť musí byť podporená nosíkom, ktorý udrží jej hmotnostné a aerodynamické zaťaženie.

Hlavnou výhodou je vyššia odolnosť a ochrana pred výstupnými plynmi z motorov a je chránená aj pred poškodením pri rotácii lietadla tzv. „tail strikom“. Ďalšia výhoda je že stabilizátor je menej ovplyvnený za normálnych letových okolností vírmi z hlavných nosných plôch a poskytuje tak väčšiu stabilitu. K nevýhodám patrí hlavne že sú výrazne nebezpečnejšie pri veľkých uhloch nábehu pri ktorých sú priamo ovplyvnené úplavom čo znamená, že sa stavajú nefunkčnými. Prúdenie v úplave spôsobuje pokles sily riadenia výškových kormidiel a hrozí nebezpečenstvo pádu. Nevýhodou je aj zložitejšia údržba

z dôvodu zhoršenej prístupnosti k horizontálnemu stabilizátoru [7].

3.3. Kačacie stabilizačné plochy

Táto konfigurácia sa prevažne používa pri bojových lietadlách, ktoré lietajú často omnoho vyššími rýchlosťami ako komerčné letúny. Bojové lietadla majú taktiež požiadavku na to byť nestabilné. Nestabilita v konfigurácii kačacích plôch vzniká najmä v dôsledku usporiadania vztlačových plôch a polohy ťažiska lietadla.

Konfigurácia kačacích plôch umiestňuje pred hlavným krídlom ďalšiu vztlačovú plochu (Angl. *canard*) ktorá generuje kladný vztlak, teda pôsobí smerom nahor. Ak je tento vztlak dostatočne veľký a ak sa zároveň ťažisko lietadla nachádza príliš vzadu v blízkosti aerodynamického stredu alebo dokonca za ním, dochádza k narušeniu rovnováhy medzi vztlakom a momentmi, čím vzniká statická nestabilita. Nestabilné lietadlo je náchylnejšie na rýchle zmeny smeru letu a sú citlivejšie na ovládanie čo znamená rýchlejšia odozva pri riadení. Tieto plochy bývajú najčastejšie skonštruované ako plávajúce stabilizátory. Ich hlavnými prednosťami oproti chvostovým plochám sú že prúdenie pre kačacie plochy nie je nijakým spôsobom narušené keďže sa nachádzajú v prednej časti a nevzniká buffeting. Ďalšou výhodou je ich všestrannosť pri čom nám môžu generovať vztlak, upravovať prúdenie vzduchu nad hlavnými nosnými plochami, kde môžu ovplyvniť distribúciu aerodynamických síl na hlavných nosných plochách alebo slúžiť ako aerodynamická brzda. Avšak nevýhodou je že sú veľmi náročné pre výskum a vývin, majú vysoké nároky na presnosť a správny návrh a umiestnenie [5,8].

4. Teoretický návrh využitia kačacích plôch v civilnom letectve

Konfigurácia s kačacími plochami (angl. *canard configuration*) predstavuje alternatívny koncept lietadla, v ktorom ako už bolo spomenuté sú horizontálne stabilizačné plochy umiestnené pred hlavným krídlom, na rozdiel od tradičných konvenčných usporiadaní. V tejto časti článku je teoreticky spracované možné využitie v civilnom letectve a základné princípy a konštrukčné aspekty návrhu modelu s kačacími plochami, ktoré môžu byť pri vhodnej adaptácii uplatniteľné v segmente civilného letectva [6,9].

Vyhotovene boli dva návrhy lietadiel, pri ktorom jedno môžeme považovať ako klasickú konfiguráciu, a druhú ako alternatívnu s kačacími stabilizačnými plochami (*canard*). Na obr. 1 je zobrazený 3D model pomocou programu AUTODESK INVENTOR 2026, ktorý bol inšpirovaný dizajnom Airbusom A320. A na obr. 1 Je vyobrazený už upravený model lietadla A320 s konfiguráciou kačacích plôch.



Obr. 1 3D návrh lietadla s klasickou konfiguráciou



Obr. 2 3D model lietadla s kačacími stabilizačnými plochami (canard)

4.1. Teoretické možnosti využitia kačacích plôch

Kačacie stabilizačné plochy by v civilnom letectve mohli mať značný potenciál vylepšiť letové vlastnosti lietadiel počas snád všetkých fáz letu. Tak napríklad počas vzletu by mohli aktívne prispievať k rýchlejšiemu dosiahnutiu požadovaného uhla nábehu, čím by sa skrátila vzletová dráha a zvýšila bezpečnosť pri kritických situáciách, ako je strata výkonu motora. V cestovnej fáze letu by kačacie plochy napríklad pomáhali optimalizovať rozloženie vztľaku medzi hlavnou nosnou plochou a predným stabilizátorom. Počas pristávania by kačacie plochy mohli zabezpečiť vyššiu kontrolu nad sklonom lietadla pri finálnom priblížení a umožniť plynulejšie dosadnutia na dráhu čo by mohlo mať dopad na zvýšenie komfortu cestujúcich a znížilo by to aj zaťaženie konštrukcie lietadla. Okrem toho by kačacie plochy mohli slúžiť ako dodatočné aerodynamické brzdy počas rýchleho klesania alebo v prípade potreby rýchleho zníženia rýchlosti [6,12].

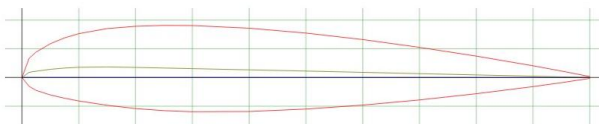
4.2. Výber aerodynamického profilu

Základom úspešného návrhu kačacej konfigurácie je zabezpečenie správneho poradia pádovej rýchlosti pre krídla. Aby sa predišlo strate stability, musí kačacia plocha vždy dosiahnuť pádovú rýchlosť ako prvá. V takom prípade sa kačacia plocha dostane mimo vztlak, čím dôjde k samovoľnému poklesu nosa lietadla a k opätovnému nárastu vztľaku po dosiahnutí požadovanej rýchlosti. Ak by hlavná nosná plocha stratila vztlak skôr, kačacia plocha by spôsobila ešte väčšie zdvihnutie nosa, čo

by zhoršilo situáciu a mohlo by viesť k strate riadenia a teda k dynamickej nestabilite. V rámci výberu aerodynamického profilu bol teda zvolený symetrický profil **NACA0006** ktorý sa nachádza na obr. 3. Tento typ profilu má kritický uhol nábehu menší (α_{canard}) s porovnaním s hlavnou nosnou plochou (NACA23015) ($\alpha_{hl.krídlo}$) z obr. 4 [6,9,10,11].



Obr. 3 Symetrický profil NACA0006 pre kačacie plochy



Obr. 4 Asymetrický profil NACA23015 pre hlavné nosné plochy

4.3. určenie veľkosti a pozície krídel a kačacích plôch

Tvar aj rozmery modelu lietadla boli inšpirované referenčným lietadlom Airbus A320. Jedná sa o časti lietadla ako napríklad plochu nosných plôch, veľkosť trupu, rozpätie krídel, a pod. Čo je veľmi dôležité pri implementácii kačacích plôch, teda pri náhrade horizontálneho stabilizátora, je určenie jeho veľkosti a pozície. Pozícia kačacích plôch sa určila vzdialenosťou od ťažiska lietadla. Je nevyhnuté, aby vytvárali aspoň kladný alebo neutrálne stabilný moment okolo ťažiska. Výpočty vychádzali z požiadavky na statickú pozdĺžnu stabilitu, pričom neutrálny bod lietadla musel byť umiestnený za ťažiskom. Pozícia kačacej plochy bola navrhnutá tak, aby generovala kladný vztlak, čím znižovala zaťaženie hlavného krídla a tým aj celkový aerodynamický odpor. Veľkosť plochy bola dimenzovaná tak, aby pri bežných letových režimoch nebola potrebná významná zmena uhlu nábehu hlavného krídla [9,12].

5. ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

V rámci bakalárskej práce bol vytvorený simulačný model pomocou metodiky CFD oboch modelov lietadiel, prvý pre klasickú konfiguráciu ako aj pre konfiguráciu kačacích plôch implementovanú pre lietadlo Airbus A320. Simulácia bola uskutočnená v programe ANSYS Fluent.

5.1. Príprava numerických modelov lietadiel

Ako prvé bolo potrebné zadefinovať okrajové podmienky pre numerický model.

- Rýchlosť lietadla : 150 m/s
- Nadmorská výška : 0m (101 325 Pa tlak)
- Druh letu : Horizontálny let

Rýchlosť 150 m/s alebo 540 km/h bola zvolená vzhľadom na stabilitu výpočtu a zároveň aj turbulencie prúdenia okolo krídel modelu. Zvolená rýchlosť je vyššia ako rýchlosti pri nízkych Reynoldsových číslach, pri ktorých by mohlo dôjsť k zmene charakteru prúdenia. Vyššia rýchlosť nám teda zabezpečuje stabilnejší režim prúdenia v porovnaní s veľmi nízkymi rýchlosťami. Táto rýchlosť nám umožňuje simuláciu

podmienok pri použití menej presnej výpočtovej siete (mesh) ktorá sa z časovej náročnosti nedala zvládnuť.

5.2. Porovnanie výsledkov

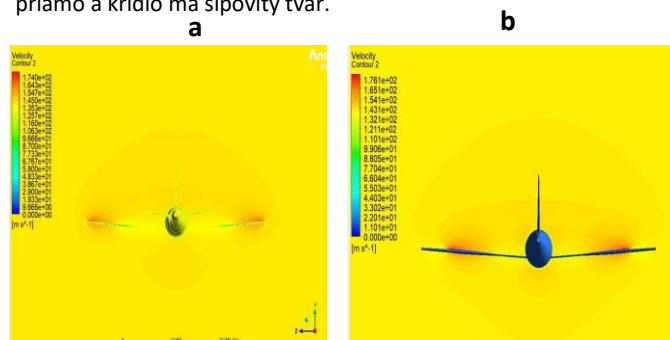
Konkrétne porovnanie výsledkov simulácie je možné vidieť na obr. 5 ktorý sumarizuje najdôležitejšie numerické výsledky z CFD. Ako je možné vidieť vyhodnocoval sa odpor a vztlak na hlavných nosných plochách, na horizontálnom stabilizátore a vertikálnom stabilizátore. Vztlak generovaný na vertikálnom stabilizátore nebol pripočítaný do výslednej vztlakovej sily nakoľko je zanedbateľný vzhľadom na veľkosť síl ostatných plôch. Z rovnakého dôvodu nie je zahrnutý vztlak spôsobený trupom lietadla.

model	Kridlo		Horizontálny stabilizátor	
	Vztlak [N]	Odpor [N]	Vztlak [N]	Odpor [N]
Klasická konfigurácia	143 537	10 178	-13 929	651
Canard konfigurácia	129 482	11 593	26 256	1 464
% rozdiel	-10%	14%	-289%	125%
model	Vertikálny stabilizátor		CELKOVÝ	
	Vztlak [N]	Odpor [N]	Vztlak [N]	Odpor [N]
Klasická konfigurácia	1 150	1 490	129 608	10 829
Canard konfigurácia	1 316	1 285	155 738	13 057
% rozdiel	14%	-14%	20%	21%

Obr. 5 Porovnanie CFD výsledkov pre klasickú a canard konfiguráciu

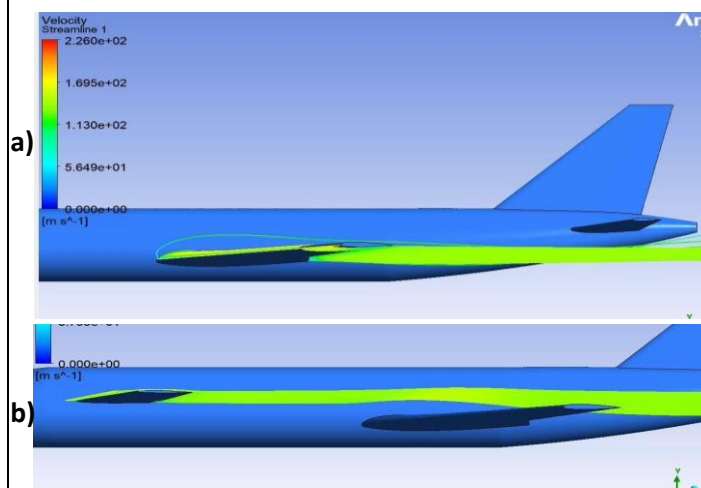
Výsledky CFD ukazujú, že lietadlo s konfiguráciou kačacích plôch, generuje o 20% vyšší vztlak vzhľadom na klasickú konfiguráciu. Vztaková sila pri chvostovej konfigurácii je negatívna vzhľadom na udržiavanie statickej rovnováhy momentových síl. Pri konfigurácii kačacích plôch sa vztlak zmenil z negatívnu na pozitívnu hodnotu. Rozdiel vztlaku horizontálnych stabilizačných plôch je 289 %. Táto vysoká hodnota je spôsobená faktom, že horizontálny stabilizátor chvosta lietadla generuje prítlak, pričom kačacia plocha generuje vztlak. Samotná účinnosť horizontálnych plôch generovať vztakovú, respektíve prítlakovú silu v závislosti od smeru pôsobenia, je teda 85 %. Vertikálny stabilizátor neukazuje výrazné rozdiely v oboch konfiguráciách a v porovnaní s hlavnými nosnými plochami a horizontálnymi stabilizátormi. Sú jeho sily zanedbateľné. Celkový odpor pri horizontálnom lete sa zvýšil o 21% čo udržiava rovnaký pomer vztlaku k odporu lietadla. Odpor sa mohol zvýšiť kvôli pridaniu dodatočných aerodynamických plôch v prednej časti trupu, ktoré spôsobujú lokálne vírenie a zvýšené trenie vzduchu. Kačacie plochy taktiež zasahujú do prúdenia smerom ku hlavnému krídlu, čo môže viesť k narušeniu laminárneho prúdenia a vzniku dodatočného interferenčného odporu. Vyšší odpor môže byť taktiež spôsobený že uhol nábehu kačacích plôch je väčší ako uhol nábehu klasického horizontálneho stabilizátora

Na obrázku 6 je zobrazené porovnanie zvislej distribúcie absolútnej rýchlosti vzduchu na rovine krídla. Z Obr. 6a je možné odčítať maximálnu lokálnu rýchlosť 176,1 m/s, pričom obr. 6b na rovnakej časti krídla ukazuje 170 m/s. Vyššia rýchlosť prúdenia pri klasickej konfigurácii naznačuje väčší podtlak nad krídlom, čo sa prejavuje vyššou vztakovou silou. V prípade konfigurácie kačacích plôch môže dôjsť k redistribúcii prúdenia, čím sa znižuje maximálna lokálna rýchlosť, ale zároveň zlepšuje stabilita a riadenie lietadla pri vyšších uhloch nábehu. Tento efekt môže súvisieť aj s predčasnou aktiváciou vírovej štruktúry z kačacích plôch. Avšak nie je možné považovať tieto informácie zo simulácie úplne vierohodne, nakoľko rez krídlom bol vykonaný priamo a krídlo má šípovitý tvar.



Obr. 6 Distribúcia absolútnej rýchlosti vzduchu v reze krídla a) Klasická konfigurácia b) Canard

Na zaver niečo k časti z kúe sa vyhodnocovali tzv. „streamliny alebo prúdnicie konkrétne v našom prípade nad krídlom. Cieľom bolo zhodnotiť potenciálny vplyv alebo zmeny lokálneho uhla nábehu pri oboch konfiguráciách. Ako je možné vidieť (Obr. 36b) kačacie plochy nám zvyšujú rýchlosť prúdnic nad hlavnou nosnou plochou. Taktiež je možné vidieť nepatrný downwash kačacích plôch ktorý ma za následok relatívny pokles uhla nábehu na hlavných nosných plochách čo môže mať za následok zníženie vztlaku hlavných nosných plôch a celkove zvýšenie odporu.



Obr. 7 Bočný pohľad prúdnic pre klasickú (a) a aj pre konfiguráciu s kačacími plochami (b)

6. Záver

Na základe vykonaného teoretického návrhu a praktických analýz je možné konštatovať, že implementácia kačacích stabilizačných plôch predstavuje potenciálne zlepšenie aerodynamických a letových charakteristík pre civilné lietadlá. Konkrétne pri referenčnom lietadle Airbus A320 sa ukázalo, že aplikácia stabilizačných plôch typu "canard" môže pozitívne ovplyvniť aerodynamickú stabilitu a efektivitu letu, čo potvrdzujú výsledky numerických simulácií prúdenia v softvéri ANSYS FLUENT. Tieto simulácie preukázali, že kačacie plochy efektívne prispievajú k optimalizácii rozloženia vztlaku a redukcii celkového odporu lietadla.

Zároveň je dôležité zdôrazniť, že správne určenie veľkosti a polohy kačacích plôch je kritickým faktorom pre dosiahnutie stabilnej konfigurácie. Výpočty a analýzy v kapitole 4 ukázali, že umiestnenie aerodynamického ťažiska a neutrálneho bodu sú parametre, ktoré musia byť dôkladne zohľadnené pri návrhu. Nevhodne zvolené parametre môžu viesť k nežiaducim aerodynamickým vlastnostiam, ako je nedostatočná stabilita alebo zhoršená ovládateľnosť lietadla, čím by sa eliminovali potenciálne výhody tejto konfigurácie.

Výsledky prezentované v kapitole 5 jednoznačne potvrdzujú teoretické predpoklady a ukazujú možnosť implementácie kačacích stabilizačných plôch v súčasných komerčných lietadlách. Porovnanie s klasickou konfiguráciou demonštrovalo, že konfigurácia s kačacími plochami by mohla poskytovať lepšie aerodynamické charakteristiky.

Referencie

- [1] Horizontal stabilizer - elevator. In NASA [online]. [cit. 2025-03-10]. Dostupné na internete: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/elv.html>>.
- [2] AYAWAHAB Horizontal stabilizer in airplane to balance in the Air. In AN Aviation Services Co. [online]. 2025. [cit. 2025-03-16]. Dostupné na internete: <<https://an.aero/horizontal-stabilizers-in-aviation-essential-for-safe-and-stable-flight/>>.
- [3] Stabilator. In Stabilator | SKYbrary Aviation Safety [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné na internete: <<https://skybrary.aero/articles/stabilator>>.
- [4] SADRAEY, M. Tail design. In Aircraft Design - Tail Design . 2012. s. 265–340. .
- [5] SCUNGIO, E. What are canards in aviation? In Simple Flying [online]. 2024. [cit. 2025-04-8]. Dostupné na internete: <<https://simpleflying.com/what-are-canards-in-aviation/>>.
- [6] GUDMUNDSSON, S. General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and procedures. . Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2014. .
- [7] The Pros and cons of a T-tail empennage. In Blog Monroe Aerospace [online]. [cit. 2025-04-20]. Dostupné na internete: <https://monroeaerospace.com/blog/the-pros-and-cons-of-a-t-tail-empennage/?srltid=AfmBOor1QW2jHNLX1tBM_IQVHGx7U-U9uXbB14KNxyj11_LyRS-SR7k>.

[8] GHOREYSHI, M. - SPALART, P.R. - GOTTLIEB, J.J. - ELIASSON, P. - KAENEL, R.V. - RIZZI, A. - LUCKRING, J.M. - LAN, C.P.E. - WILLIAMS, J.E. - MELIN, T. Canard–wing interference effects on the flight characteristics of a transonic passenger aircraft. In Aerospace Science and Technology [online]. 2017. [cit. 2025-03-18]. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1270963817304066>>.

[9] LENNON, A. Basics of R/C Model Aircraft Design: Practical Techniques for Building Better Models. . Wilton (Connecticut): Air Age, 2005.

[10] In NACA 0006 (NACA0006-IL) [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné na internete: <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0006-il>>.

[11] In NACA 23015 (NACA23015-IL) [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné na internete: <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca23015-il>>.

[12] HOUGHTON, E.L. Aerodynamics for engineering students 5th ed. . Oxford: Butterworth Heinemann, 2003. .



ANALÝZA SÚČASNÝCH A MOŽNOSTI APLIKÁCIE NOVÝCH POSTUPOV PREDIKTÍVNEJ ÚDRŽBY

David Milac
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Ján Rostáš
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article deals with the analysis of current predictive maintenance procedures and possibilities of applying its new procedures in aviation. The article examines the currently used strategies as well as their legislative frameworks and then delves deeper into predictive maintenance strategies. The aim of this article is to analyse the current state of predictive maintenance, highlight the causes of problems with its implementation in practice and to explore the future of this maintenance strategy from technical as well as legislative perspective and finally the trends that will adjust it. On the basis of study of technical articles, legislative regulations and various documents, conclusion have been reached that conclude that predictive maintenance in aviation is undoubtedly a major step forward in the field of aircraft maintenance and preservation of their airworthiness. However, the true potential of predictive maintenance remains, due to existing barriers, a question of the future technological and legislative developments in aviation and aircraft maintenance.

Keywords

Predictive maintenance, AI, Maintenance

1. Úvod

Údržba bola súčasťou letectva už od jeho začiatkov. Postupným vývojom letectva došlo aj k vývoju údržby. Začali byť potrební skúsení technici a inžinieri, ktorí disponovali odbornými znalosťami či už komponentov lietadla alebo ich systémov. S príchodom vyspelejšej techniky začali byť lietadlá viacej sofistikovanejšie a efektívnejšie a vzrástli požiadavky aj na údržbu. Údržba má za úlohu udržiavať lietadlá technicky spôsobilé na let tým, že opraví to čo sa pokazí, často to však spôsobuje neželané prestoje lietadiel a ich nedostupnosť. S príchodom digitálnej doby riadenej údajmi, sa musela aj klasická údržba pretransformovať na údržbu riadenú údajmi. Tieto údaje je následne potrebné efektívne spracovať a vytvoriť z nich užitočné informácie pre riadenie údržby. Tento článok sa zaoberá práve prediktívnou údržbou, ktorá by v teoretickej forme vedela veľmi prispieť do letectva. Skúma požiadavky a problémy s aplikovaním prediktívnej údržby do prevádzky a analyzuje aj súčasný stav prediktívnej údržby a súčasne dostupné nástroje, ktoré môžeme považovať za nástroje prediktívnej údržby. V závere sa následne zaoberá budúcnosťou prediktívnej údržby, o ktorej vieme, že ju vo veľkom bude ovplyvňovať umelá inteligencia a strojové učenie. Už dnes sú tieto technológie využívané nielen v letectve a je nepochybné, že ich zakomponovanie do systému a využívanie má pozitívny prínos. Cieľom tohto článku je poukázať na technológiu a postupy prediktívnej údržby, ako aj priblížiť príčiny, ktoré bránia jej širšiemu uplatneniu v civilnom letectve.

2. Metodika a metódy skúmania

Táto kapitola článku je zameraná na metódy a postupy, ktoré boli použité pri zbere, spracovaní a vyhodnocovaní získaných informácií. Hlavným cieľom tohto článku je analyzovať súčasný stav prediktívnej údržby, identifikácia problémov s jej

zavádzaním do praxe a analýza budúcnosti prediktívnej údržby v letectve. Pri zbere údajov a informácií boli použité odborné články, oficiálne stránky Európskej agentúry pre bezpečnosť letectva (EASA), odborné štúdie a oficiálne stránky poskytovateľov aktuálne dostupných nástrojov prediktívnej údržby na trhu, ako napríklad Boeing alebo Airbus. Použité boli aj informácie z aktuálne platnej legislatívy Slovenskej republiky a Európskej únie. Pre definície a poznatky z leteckej údržby boli využité odborné prezentácie využívané pri výučbe predmetu Technológia údržby lietadiel.

Na začiatku bolo potrebné zadať definovať si údržbu ako takú a pojmy s ňou spojené. Na legislatívnu časť údržby boli použité aktuálne predpisy L8 a L6 a takisto aj Letecký zákon a nariadenia komisie EÚ ako aj dokumenty EASA. Ďalšou úlohou bola identifikácia požiadaviek a problémov so zavádzaním prediktívnej údržby do praxe. Využitá bola syntéza údajov a následné identifikovanie problémov pri zavádzaní prediktívnej údržby formou analýzy s využitím informácií z odborných článkov a informácií o aktuálne dostupných nástrojoch prediktívnej údržby. Pri súčasnom stave prediktívnej údržby bola pozornosť zameraná na štyri aktuálne dostupné riešenia prediktívnej údržby od leteckých výrobcov alebo organizácií poskytujúcich údržbu (MRO). Boli uvedené výhody jednotlivých systémov, ako aj popísané ich funkcie. Ďalšiu časť tvorila budúcnosť prediktívnej údržby ako v technickom smere tak aj v legislatívnom smere, kde bola využitá syntéza údajov z oficiálnych stránok EASA ako aj publikácií tejto agentúry. Táto časť sa zaoberala novými trendami, ktoré budú v budúcnosti určovať smer údržby, keďže tieto technológie sa vo veľkom začínajú využívať už dnes. Poslednou časťou bolo vyhodnotenie analýzy, kde boli zosumarizované všetky dôležité aspekty a informácie týkajúce sa postupov prediktívnej údržby.

3. Poznatky z prediktívnej údržby

Údržba tvorí, dôležitú časť celého leteckého priemyslu, už od jeho začiatkov. Aj keď sú už v dnešnej dobe používané moderné technológie a za väčšinou nehôd stojí zlyhanie ľudského faktora, stále hrozí nebezpečenstvo zlyhania lietadlovej techniky vplyvom dlhodobého používania a s tým vyplývajúceho opotrebovávania, prípadne prevádzkových poškodení. Ak je komponent systému lietadla zaťažovaný v cykloch alebo kontinuálne, môže dôjsť k jeho poškodeniu do takej miery, že nebude schopný ďalej správne fungovať. Ak dôjde k takémuto poškodeniu, je na mieste podľa údržbovej dokumentácie buď oprava daného komponentu lietadla alebo jeho kompletná výmena za nový kus. V rámci šetrenia finančných prostriedkov a využitia potenciálu technickej životnosti súčiastok, by bolo vhodné mať nástroj, ktorý by vedel spoľahlivo predpovedať degradáciu komponentu a vedel by upozorniť na nutnú výmenu daného komponentu lietadla.

3.1. Definície údržby

Technická údržba lietadiel je proces, pri ktorom sa vykonávajú na lietadle také úkony, ktorými sa zabezpečí jeho letová spôsobilosť, teda oprava, výmena alebo prehliadka lietadla, následkom ktorej je lietadlo schopné bezpečného návratu do prevádzky.

Nariadenie komisie (EÚ) č. 1321/2014 definuje údržbu takto: „Údržba znamená jednu z týchto činností alebo kombináciu týchto činností: generálna oprava, oprava, prehliadka, výmena, modifikácia alebo odstránenie porúch lietadla alebo komponentu s výnimkou predletovej prehliadky“[1].

V predpise L8 Letová spôsobilosť lietadiel, je zase údržba definovaná ako: „Vykonávanie úloh požadovaných na zabezpečenie zachovania letovej spôsobilosti lietadla, ktoré zahŕňajú buď jednotlivu alebo vzájomnú kombináciu generálnej opravy, prehliadky, výmeny, odstránenia porúch a zapracovania modifikácie alebo opravy“[2].

3.2. Legislatíva

Právne a legislatívne informácie týkajúce sa údržby lietadiel nájdeme v predpisoch L6 Prevádzka lietadiel a L8 Letová spôsobilosť lietadiel, ktoré vychádzajú z medzinárodných štandardov a doporučených postupov Medzinárodnej organizácie pre civilné letectvo (ICAO).

Konkrétne v predpise L6 nájdeme tieto informácie v Hlave 8 – Údržba letúnov, ktorá sa skladá celkom z piatich častí, ktoré majú príslušné podčasti. V týchto častiach nájdeme informácie o zodpovednostiach vlastníka alebo nájomcu lietadla ohľadom údržby, informácie za akých okolností sa letún nesmie používať, informácie, ktoré záznamy o údržbe sa musia uchovávať a aj časové obdobie ich uchovania, informácie o zachovaní letovej spôsobilosti, informácie o modifikáciách lietadla a informácie a pokyny k potvrdeniu o vykonanej údržbe [3].

V predpise L8 nájdeme informácie týkajúce sa údržby v Hlave 10 – Informácie o údržbe, ktorá sa skladá zo štyroch častí. Nájdeme tu informácie na tvorbu postupov pri údržbe a opisy toho, čo by mali dané informácie obsahovať. Ďalej nájdeme informácie o údržbe, teda odporúčané spôsoby a postupy vykonávanie údržby, ako aj návod na diagnostiku chýb, informácie

o programe údržby, opis letúna a informácie o údržbe vyplývajúce z typového osvedčenia [2].

Ďalším dôležitým predpisom, ktorý obsahuje informácie o údržbe a stanovuje požiadavky na údržbu Nariadenie komisie (EÚ) 1321/2014. Toto nariadenie sa skladá z celkom ôsmich častí:

- Časť M – Zachovanie letovej spôsobilosti
- Časť 145 – Organizácie oprávnené k údržbe lietadiel
- Časť 66 – Požiadavky na osvedčujúci personál
- Časť 147 – Organizácie pre výcvik údržby
- Časť T – Technické preskúmanie letovej spôsobilosti lietadla
- Časť ML – Údržba a letová spôsobilosť malých lietadiel do 2730 kg
- Časť CAMO – Organizácia riadenia zachovania letovej spôsobilosti
- Časť CAO – Kombinovaná organizácia zachovania letovej spôsobilosti [1], [4].

3.3. Stratégie údržby

Pri vykonávaní údržby na lietadle je možnosť výberu z viacerých stratégií alebo prístupov k údržbe.

Prvou stratégiou je reaktívna údržba, nazývaná tiež ako údržba po poruche (run to failure). Pri používaní tejto stratégie údržby dochádza k výmene komponentu lietadla až vtedy, keď sa pokazí a nie je schopná ďalej plniť svoj účel. Technický život komponentu sa teda využíva na maximum ale nevýhodou tejto stratégie sú dlhé neplánované prestoje lietadiel kvôli výmene pokazeného komponentu. Túto stratégiu je preto vhodné využívať vtedy, ak je zabezpečená rýchla výmena poškodeného komponentu za nový kus. K dispozícií sú teda dva kusy rovnakého komponentu, jeden na lietadle a jeden na sklade tzv. v stave pohotovosti. Pri poškodení sa komponent vymení za nový a poškodený komponent sa buď opraví, alebo sa zabezpečí čisto nový kus do stavu pohotovosti. Reaktívna údržba teda reaguje na poruchu, ktorá sa už stala. Výhodou tejto stratégie je teda využitie plnej technickej životnosti komponentu ale nevýhodou sú prestoje lietadiel vplyvom neplánovanej údržby [5].

Ďalšou stratégiou údržby je preventívna údržba. Pri tejto stratégií údržby sa komponent vymieňa preventívne, pred jeho poškodením, teda ešte pred dosiahnutím kritického bodu technickej životnosti komponentu. Úmyslom tejto stratégie údržby je minimalizovať riziko poškodenia komponentu a s tým spojené prestoje lietadiel z dôvodu neplánovanej údržby. Základmi tejto stratégie sú všeobecné teórie spoľahlivosti a predpokladané časové priebehy určitých dôležitých parametrov spoľahlivosti. Na základe tohto sú stanovené intervaly výmeny a opráv poškodených komponentov. Preventívnu údržbu je možné rozdeliť na dve kategórie a to:

- Údržba s konštantným intervalom

- Údržba s premenlivým intervalom [5].

Pri preventívnej údržbe s konštantným intervalom sa počíta s tým, že plánovanú životnosť majú len určité komponenty a ostatné komponenty vydržia po celú dobu prevádzky lietadla [5].

Pri preventívnej údržbe s premenlivým intervalom sa interval údržby v závislosti na veku a spôsobe prevádzkovania zariadenia mení (väčšinou skracuje) tak, aby zostala zachovaná zmena životnosti komponentu spôsobená zmenou mechanických, materiálových a geometrických vlastností stroja ako celku [5].

Výhodou preventívnej údržby je teda minimalizovanie neplánovanej údržby lietadla vplyvom poškodennej súčiastky. Nevýhodou sú však vyššie náklady spojené s plánovanými opravami a výmenami komponentov podľa stanoveného rozvrhu. Nevýhodou je aj to, že komponent je vymenený predčasne, kedy jeho technická životnosť nemusí byť až tak kritická a komponent by mohol fungovať v prevádzke ešte niekoľko letových hodín [5].

Poslednou stratégiou je prediktívna údržba. Pri tejto stratégii je komponent vymenený vtedy, keď je technická životnosť komponentu lietadla využitá do maximálnej miery, teda komponent je treba vymeniť, pretože jeho ďalšie používanie by malo za následok jeho poškodenie. Pri tejto údržbe sa využívajú moderné postupy, ako napríklad diagnostika, modely na predpovedanie degradácie komponentu, umelá inteligencia a strojové učenie. Je to „ideálna“ stratégia pre údržbu v leteectve, pretože ako už bolo spomenuté, technická životnosť je využitá na maximum a komponent sa vymieňa až vtedy, keď je to naozaj potrebné. Na druhú stranu táto stratégia má aj svoje negatíva. Hlavnou nevýhodou tejto stratégie sú jej vysoké počiatočné náklady, keďže na úspešné zavedenie tejto stratégie je potrebná určitá softvérová infraštruktúra. Počiatočné vysoké náklady sú však kompenzované počas jej používania, kedy v porovnaní s reaktívnou a preventívnou údržbou výrazne šetrí náklady na údržbu [5].

Ministerstvo energetiky USA odhaduje, že dobre navrhnutý systém prediktívnej údržby vie znížiť náklady na údržbu až o 30%. Nezávislá poradenská spoločnosť zase odhaduje, že úspory leteckých spoločností pri aktívnom využívaní prediktívnej údržby a monitorovania stavu lietadiel by mohli priniesť úspory vo výške až 3 000 000 000 USD, čo predstavuje ekvivalent 2 880 000 000 EUR [6].

4. Požiadavky pre úspešné zavedenie prediktívnej údržby

Prediktívna údržba v leteectve kladie vysoké nároky na úspešné zavedenie do praxe, najmä kvôli potrebe spracovania veľkého množstva prevádzkových dát. Údržba sa plánuje na základe pravidelného monitorovania technického stavu komponentov pomocou snímačov, ktoré sledujú fyzikálne veličiny ako vibrácie, tlak alebo teplota. Na základe analýzy týchto údajov sa predpovedá miera degradácie a komponenty sa vymieňajú pred dosiahnutím kritického stavu. Moderné lietadlá, ako napríklad Airbus A380, ktorý využíva 25 000 snímačov, poskytujú ideálne podmienky na využitie prediktívnej údržby [7].

Analýza dát prebieha prostredníctvom štatistických modelov a algoritmov strojového učenia, pričom v praxi sa využívajú tri hlavné prístupy:

- Diagnostika v reálnom čase (zaznamenanie porúch počas letu a ich následná oprava na zemi)
- Asistencia pri lete v reálnom čase (pomoc a pokyny pilotovi počas letu)
- Prognostika (predpovedanie degradácie komponentov alebo systémov pomocou environmentálnych a prevádzkových podmienok) [7].

Dáta používané na údržbu zahŕňajú časové údaje, písomné hlásenia a grafické zobrazenia. Najviac sa využívajú časové údaje vďaka ich jednoduchému spracovaniu, zatiaľ čo písomné hlásenia čelia problémom s jazykovou interpretáciou. Grafické dáta, hoci menej rozšírené, sú prínosné pri vizuálnych kontrolách lietadiel, pričom sa čoraz viac zvažuje ich automatizácia pomocou robotov a umelej inteligencie. Tieto dáta ako aj zdroje týchto dát sú uvedené nižšie v tabuľke 1 [7].

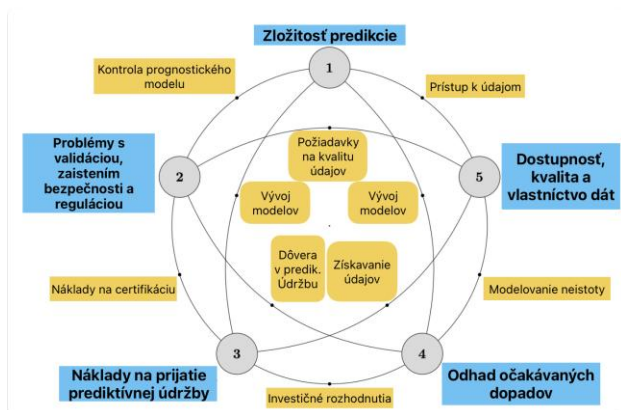
Tabuľka 1, Dáta a ich zdroje, zdroj: [7]

Typ dát	Zdroje dát
Časové údaje	Turbodúchadlový motor, hydraulika a ložiská podvozdu
Písomné hlásenia	Hlásenia pilotov, záznamy o poruchách, hlásenia po lete
Grafické údaje	Zobrazovanie trupu a krídel lietadla

Automatizované systémy si postupne nachádzajú uplatnenie. Napríklad Airbus využíva technológiu „Drone and Augmented Reality Inspections“. Pri tejto technológii sú využívané drony, umelá inteligencia a rozšírená realita na inšpekcie trupu lietadla. Technológia je zatiaľ aplikovaná vo vojenskom sektore, s ktorým aj Airbus spolupracuje na týchto technológiách. Pri lietadle Airbus A400 bolo za pomoci tejto technológie dosiahnutá úspora času na inšpekcií trupu, ktorá sa znížila z niekoľkých týždňov na dve hodiny. Je teda pravdepodobné, že táto technológia by sa mohla rozšíriť aj do civilného letectva [7], [8]

5. Problémy so zavádzaním prediktívnej údržby do praxe

Napriek výhodám prediktívnej údržby stále nie je vo svete využívaná vo veľkom. Národný úrad pre letectvo a vesmír (NASA) skúmala, súčasné bariéry, ktoré bránia jej zavedeniu do praxe. Obrázok jedna zobrazuje identifikované bariéry.



Obrázok 1, Prekážky brániace úspešnému zavedeniu prediktívnej údržby, zdroj: [6]

5.1. Zložitosť predikcie

Prediktívna údržba je náročná na zavedenie kvôli zložitosti prognostiky a vzájomnej prepojenosti systémov lietadla. Prognostické modely často dobre fungujú v laboratórnych podmienkach, ale v reálnej prevádzke zlyhávajú, pretože degradácia komponentov závisí od prostredia, štýlu pilotáže a individuálneho opotrebovania súčiastok. Presnosť predikcií znižuje aj fakt, že po oprave alebo výmene sa komponenty správajú odlišne. Modelovanie a implementácia systémov navyše čelia problémom s neistotami v údajoch a vysokou výpočtovou náročnosťou, čo je problém najmä pri zložitých a prepojených systémoch. Logistické a zmluvné bariéry takisto komplikujú zavedenie prediktívnej údržby. Existujúce procesy a zmluvy často nepočítajú s dynamickými predikciami, čo sťažuje ich integráciu najmä na vzdialených letiskách. Veľkým problémom sú aj počiatočné investície – treba vyvíjať nové nástroje na modelovanie systémov, vytvárať presnejšie prediktívne algoritmy a riešiť problém výpočtovej náročnosti, napríklad použitím náhradných modelov alebo technológií ako neuromorfne či kvantové výpočty. Zároveň je kľúčová spolupráca odborníkov z technických aj dátových oblastí, modernizácia procesov logistiky a údržby, a zvyšovanie kvalifikácie pracovníkov prostredníctvom špecializovaného vzdelávania a výcviku [6].

5.2. Problémy s validáciou, zaistením bezpečnosti a reguláciou

Prediktívna údržba musí byť overená tak, aby neohrozila bezpečnosť leteckej dopravy a spĺňala požiadavky regulačných orgánov ako EASA či FAA. Je nevyhnutné preukázať, že nové systémy a prognostické modely nevedú k zvýšenému riziku zlyhania. Jednou z hlavných prekážok je chýbajúca štandardizácia metodík, postupov a noriem pre vývoj a certifikáciu prediktívnych systémov. Táto absencia vedie k nejednotnému hodnoteniu bezpečnosti a spomaľuje schvaľovacie procesy. Hoci EASA a FAA podnikli kroky vpred, implementácia prediktívnej údržby zostáva časovo náročná [6].

Ďalšie významné bariéry zahŕňajú:

- Validáciu algoritmov – nutnosť posudzovať kvalitu dát, robustnosť algoritmov a ich schopnosť zvládať zmeny v systémoch a prostredí

- Vzdelanie pracovníkov – inžinieri musia mať odborné znalosti o fungovaní systémov aj o rizikách prediktívnej údržby
- Kvalitu údajov – chybné senzory, neúplné alebo nekonzistentné dáta znižujú presnosť modelov a vyžadujú prísnejšie testovanie [6].

Na prekonanie týchto problémov je potrebné investovať do vývoja noriem a príručiek na validáciu prediktívnych systémov. Ďalej je potrebná investícia do validácie algoritmov, najmä tých založených na strojovom učení (napr. pomocou prognostických kariet z AI/ML komunity). Je potrebné investovať aj do modernizácie infraštruktúry, vrátane vysoko výkonných výpočtových systémov, správy veľkých dát a zabezpečených sietí. Ďalšie investície by sa mali zamerať na podporné technológie ako vizualizáciu kvality predpovedí, nástroje na automatickú validáciu dát a vývoj open-source riešení pre priemyselné použitie. Takéto nástroje môžu výrazne prispieť k bezpečnému a efektívnemu nasadeniu prediktívnej údržby v letectve [6].

5.3. Náklady na implementáciu prediktívnej údržby

Zavedenie prediktívnej údržby v letectve je finančne a časovo náročné, pričom práve vysoké počiatočné náklady brzdia jej širšie rozšírenie. Vývoj spoľahlivých modelov degradácie môže trvať niekoľko rokov. Náklady možno rozdeliť na implementačné a prevádzkové [6].

Implementačné náklady zahŕňajú vývoj výpočtových modelov, výrobu a obstaranie senzorov, integráciu technológií do existujúcich systémov a riešenie problémov so starším hardvérom a softvérom. Významnou položkou sú aj náklady na zber veľkého množstva kvalitných údajov vrátane inštalácie, kalibrácie snímačov a riešenia prenosu a ukladania dát [6].

Prevádzkové náklady tvoria mzdy vyškoleného personálu, údržba systémov, modernizácia infraštruktúry a integrácia nových systémov so staršími. Dôležité sú aj výdavky spojené s certifikáciou a validáciou systémov, aby bola zachovaná vysoká úroveň bezpečnosti [6].

Neúspešné predikcie môžu navyše viesť k neplánovaným prestojom lietadiel a zvýšeným nákladom. Na úspešné zavedenie prediktívnej údržby je potrebné investovať aj do vytvárania spoločných noriem, technologických platforiem a budovania základných softvérových balíkov, ktoré podporia vývoj a aplikáciu tejto stratégie [6].

5.4. Odhad očakávaných dopadov

Pri zavádzaní prediktívnej údržby je dôležité vykonať komplexnú analýzu nákladov a prínosov. Letecké spoločnosti, výrobcovia OEM a MRO musia posúdiť, či investícia do tejto technológie prinesie očakávané výhody. Odhad dopadov na civilné letectvo je však zložitý, keďže neexistujú štandardizované metodiky na modelovanie životného cyklu ani presné nástroje na predikciu nákladov a rizík. Väčšina spoločností, ktoré odkladá zavedenie prediktívnej údržby, uvádza práve neschopnosť kvantifikovať budúce prínosy ako hlavný dôvod. Modelovanie životného cyklu zahŕňa analýzu obstarávania, prevádzky, údržby a opráv, no presné hodnotenie dopadov prediktívnej údržby zatiaľ nie je

spoľahlivo dostupné. Modelovanie neistoty je ďalšou výzvou. Neistoty vznikajú buď z prirodzenej náhodnosti systémov, alebo z nedostatku znalostí, pričom ich správne riadenie je kľúčové pre budúce inovácie. Na trhu náhradných dielov existuje silná konkurencia medzi leteckými spoločnosťami, nezávislými MRO a výrobcami OEM. OEM výrobcovia majú výhodu v prístupe k originálnym údajom, zatiaľ čo ostatní musia spoliehať na reverzné inžinierstvo, čo zvyšuje náklady a komplikuje rozvoj prediktívnej údržby [6].

NASA navrhuje dve hlavné riešenia: vytvorenie štandardizovanej metodiky na simuláciu životného cyklu lietadiel, ktorá umožní izolovať a kvantifikovať prínosy prediktívnej údržby, a vypracovanie metodiky na zapracovanie neistôt do týchto odhadov. K tomu by sa mali využiť techniky ako analýza citlivosti či nepravdepodobnostné modelovanie, čo by mohlo zlepšiť presnosť a dôveryhodnosť predikcií pre rozhodovanie v praxi [6].

5.5. Dostupnosť a kvalita údajov

Technológie prediktívnej údržby sú silne závislé od dostupnosti, kvality a správneho spracovania údajov. Medzi hlavné problémy patrí obmedzený prístup k dátam, otázky ich vlastníctva, ochrany súkromia a technické prekážky pri zbere a prenose údajov [6].

Správnosť údajov je kritická – nie vždy sú dostupné snímače na sledovanie potrebných parametrov alebo sú náklady na ich implementáciu neprimerane vysoké. Okrem toho prenos údajov počas letu je často obmedzený kvôli technickým a finančným faktorom. Digitalizácia údržbových záznamov je nevyhnutná, keďže papierová dokumentácia stále prevažuje a komplikuje automatizované spracovanie údajov [6].

Vlastníctvo dát je ďalším problémom – OEM výrobcovia často obmedzujú prístup k prevádzkovým údajom, čo brzdí rozvoj prediktívnej údržby u MRO organizácií a leteckých spoločností [6].

Potrebné sú investície do nových technológií snímania, digitálneho prenosu údajov (napr. Gatelink cez satelity), digitalizácie záznamov a automatizácie inšpekcií. Kľúčové je tiež vytvorenie štandardizovaných formátov pre zber a zdieľanie údajov v spolupráci s organizáciami ako SAE, IEEE alebo IDCA. Podporované by malo byť aj vytváranie anonymizovaných dátových súborov na školenie a validáciu modelov prediktívnej údržby a rozvoj technológií na bezpečné zdieľanie údajov medzi organizáciami [6].

6. Súčasnosť a nové trendy aplikovania prediktívnej údržby

Aj napriek očividným výhodám prediktívnej údržby oproti ostatným stratégiám údržby, stále nie je aplikovaná a používaná celosvetovo. V iných oblastiach priemyslu (napríklad automobilový a výrobný priemysel) je táto stratégia úspešne využívaná a zaznamenáva úspech. Je to z toho dôvodu, že veľa ľudí a odborníkov stále neverí tejto stratégii. Jeden z najriešenejších faktorov v civilnom letectve je bezpečnosť a veľa odborníkov sa obáva, či prediktívna údržba, jej nástroje a softvéry budú schopné udržať sa nad prijateľnou hranicou bezpečnosti. Veľké letecké spoločnosti a výrobcovia však

investujú veľké peniaze do vývoja systémov prediktívnej údržby s vidinou veľkých časových a finančných úspor, ktoré nepochybne patria ku kľúčovým pozitívam stratégie prediktívnej údržby. Pravda je však taká, že na trhu ešte nie je žiadny iný systém alebo nástroj, ktorý by stopercentne dosahoval také výsledky ako prediktívna údržba [9].

6.1. Súčasne dostupné nástroje prediktívnej údržby

Nástroje a systémy prediktívnej údržby v súčasnosti ponúkajú niektoré väčšie letecké spoločnosti ako aj výrobcovia lietadiel. Spoločnosť Boeing ponúka Aircraft Health Management, konkurenčný Airbus má v ponuke systém Skywise. Spoločnosť Air France Industries a KLM Engineering & Maintenance ponúka svoj systém Prognos, Lufthansa Technik má zase systém Aviator.

6.1.1. *Airplane Health Management – Boeing*

Airplane Health Management (AHM) od Boeingu monitoruje stav lietadla počas letu a v prípade poruchy odosiela údaje pozemnému personálu, ktorý sa môže pripraviť na potrebnú údržbu po pristátí. Hoci ide skôr o reaktívnu stratégiu, Boeing systém prezentuje aj ako nástroj na prediktívnu údržbu, ktorý pomáha znižovať meškania a náklady spojené s neplánovanou údržbou [10].

Systém pozostáva z troch hlavných modulov:

- Riadenie porúch v reálnom čase – diagnostikuje poruchy počas letu pomocou automatických alebo manuálnych prenosov dát
- Prispôsobiteľné oznámenia a analýzy – umožňujú identifikovať a riešiť problémy skôr, než sa prejavia vážnejšie
- Monitorovanie výkonnosti – sleduje spotrebu paliva a emisie na podporu efektívnej prevádzky [11].

AHM je dostupný cez platformu MyBoeingFleet.com a využíva ho viac ako 75 leteckých spoločností, pričom je kompatibilný s lietadlami Boeing 737NG, 737 MAX, 747-400, 747-8, 777 a 787 Dreamliner. Airplane Health Management (AHM) dnes predstavuje balík riešení na zamedzenie neplánovaným prestojom lietadiel. Obsahuje aj nástroj Insight Accelerator, ktorý od roku 2022 poskytuje pokročilú analýzu letových údajov (QAR/CPL) a umožňuje vytvárať prispôbené prediktívne upozornenia pre konkrétnu flotilu. Vylepšená verzia Insight Accelerator 2.0 pridáva podporu zoznamov minimálneho vybavenia (MEL), rozšírenú knižnicu funkcií, vylepšené prostredie a nové možnosti upozorňovania. Ďalším riešením je Boeing Maintenance Performance Toolbox, aplikácia na správu údržbových dokumentov a reportov, ktorá centralizuje informácie o celej flotile a umožňuje jednoduchý prístup k dokumentácii kedykoľvek a odkiaľkoľvek, čím zefektívňuje komunikáciu a plánovanie údržby [11], [12], [13], [14].

6.1.2. *Skywise – Airbus*

Skywise je digitálna platforma, ktorú vyvinul Airbus v spolupráci s Palantir Technologies na zber, integráciu a analýzu údajov z výroby, údržby a prevádzky lietadiel. Pôvodne slúžila ako úložisko dát, no neskôr sa vyvinula na komplexný nástroj na

podporu rozhodovania v letectve. Systém vznikol, keď Airbus v roku 2015 potreboval zrýchliť výrobu A350. Integrácia výrobných dát v reálnom čase vďaka platforme viedla k 33 % zrýchleniu dodávok [15], [16].

V roku 2022 bol predstavený Skywise Core [X], rozšírená verzia platformy, ktorá umožňuje simulácie "What-if" scenárov a prepája údaje v reálnom čase s inými systémami. Skywise Core [X] je dostupný v troch balíkoch, líšiacich sa rozšírením dátových služieb, analytických funkcií, možností spolupráce a výpočtového výkonu. Ďalším nástrojom je Skywise Fleet Performance +, ktorý využíva strojové učenie na predpovedanie systémových porúch, znižovanie neplánovaných prestojov a zvyšovanie spoľahlivosti flotily. Tento systém vznikol spoluprácou Airbusu a partnerov zo siete Digital Alliance (napr. Delta TechOps, GE Aerospace) [15], [17].

Pôvodne určená len pre Airbus flotily, dnes platformu Skywise využíva viac ako 48 000 používateľov po celom svete, vrátane leteckých spoločností, dodávateľov, MRO organizácií a regulačných úradov. K platforme je pripojených viac ako 11 900 lietadiel rôznych výrobcov a dostupných je vyše 30 aplikácií optimalizujúcich prevádzku [18], [19].

6.1.3. Prognos – AirFrance Industries & KLM Maintenance & Engineering

Prognos je súbor riešení prediktívnej údržby vyvinutý skupinou Air France-KLM, ktorý predpovedá poruchy ešte pred ich vznikom. Využíva rozsiahle technické znalosti a prácu s veľkými dátami, pričom kombinuje skúsenosti prevádzkovateľa a poskytovateľa MRO služieb. Prognos je rozdelený na štyri hlavné moduly: Aircraft, Engine, APU a Inventory [20].

Prognos for Aircraft zhromažďuje dáta z tisícok senzorov počas letu a na zemi a včas varuje pred možnými poruchami. Vysoká presnosť algoritmov potvrdila správnosť všetkých iniciovaných zásahov, pričom systém prispieva k výraznému zníženiu meškaní a počtu pilotných hlásení [21].

Prognos for Engine ponúka trojstupňové monitorovanie motorov (krátkodobé, strednodobé a dlhodobé) a podporuje motory od výrobcov GE, CFM International a Rolls-Royce [22].

Prognos for APU, vyvinutý cez dcérsku spoločnosť EPCOR, monitoruje pomocné pohonné jednotky (APU) pomocou dát prenášaných počas prestávok na stojisku a včas predpovedá poruchy komponentov [23].

Prognos for Inventory optimalizuje zásoby náhradných dielov a riadenie dodávateľského reťazca pomocou pokročilej analýzy a simulácií, čím zvyšuje efektívnosť investícií a dostupnosť potrebných dielov [24].

6.1.4. AVIATAR – Lufthansa Technik

AVIATAR je otvorená digitálna platforma pre letecký priemysel, ktorá centralizuje širokú škálu aplikácií pre správu údržby, analýzu dát a prediktívnu údržbu. Vďaka cloudovej infraštruktúre spĺňajúcej najvyššie bezpečnostné štandardy umožňuje zber, analýzu a výmenu údajov v reálnom čase, pričom sa flexibilne prispôsobuje individuálnym potrebám používateľov bez závislosti od Lufthansa Technik či servisných zmlúv. AVIATAR obsahuje nástroje ako monitorovanie teploty

kabíny a využitia APU (s úsporami na údržbe a palive), systém monitorovania stavu lietadla s prepojením na manuály a reálnymi údajmi o flotile, optimalizáciu traťovej údržby podľa dostupných zdrojov a manažment MRO aktivít vrátane plánovania, zásobovania a fakturácie. Medzi ďalšie funkcie patrí prediktívna analýza stavu lietadiel, ktorá sleduje správanie komponentov, balík spoľahlivosti pre okamžité hodnotenie flotily a digitálny technický denník, ktorý nahrádza papierové záznamy a umožňuje efektívne hlásenie porúch cez mobilné zariadenia v reálnom čase [25], [26].

6.2. *Budúcnosť prediktívnej údržby*

Azda najväčším trendom a nepochybne aj budúcnosťou nielen letectva ale aj iných oblastí je umelá inteligencia. Dokazuje svoje benefity už dnes, či v bežnom živote alebo aj v komplikovaných matematických výpočtoch a predpovediach. Nakoniec aj vyššie zmienené súčasne dostupné nástroje prediktívnej údržby vo veľkom využívajú AI a ML. Pre mnohé tieto nástroje je to kľúčový prvok ich fungovania a schopnosť predpovedať budúci stav komponentu lietadla, na základe analýzy tisícok prípadov zlyhania daného komponentu a výpočtových modelov, ktoré sa snažia čo najpresnejšie predpovedať kritický moment stavu komponentu, kedy je potrebná jeho výmena.

EASA si uvedomuje rastúci význam umelej inteligencie (AI) v letectve. AI by mala pomáhať v oblastiach ako riadenie letu, predpoveď počasia, optimalizácia údržby, znižovanie uhlíkovej stopy a efektívnejšie riadenie letovej prevádzky či bezpečnosti na letiskách. Významnú úlohu zohrá aj pri integrácii dronov, autonómnych zariadení a v oblasti kybernetickej bezpečnosti. EASA už v roku 2020 vydala „Plán pre umelú inteligenciu“, aktualizovaný v roku 2023, ktorým sa snaží bezpečne začleniť AI do civilného letectva a prispôsobiť existujúce predpisy. Agentúra podporuje vývoj bezpečnostných štandardov a schvaľovanie systémov založených na strojovom učení (ML). AI aplikácie boli rozdelené do troch úrovní podľa miery autonómie: od asistencie človeku až po samostatné rozhodovanie systémov bez ľudského zásahu. Podrobnejšie sú tieto kategórie rozpisané v tabuľke 2. EASA zároveň reaguje na legislatívne zmeny v rámci pripravovaného európskeho nariadenia o AI, ktoré ovplyvní aj letectvo. Súčasný predpis sú otvorené zavádzaniu AI, no budú potrebné ich úpravy podľa špecifických oblastí využitia [27], [28], [29].

Tabuľka 5, Tri úrovne aplikácie strojového učenia, zdroj:[29]

Úroveň 1: Pomoc človeku	Úroveň 2: Spolupráca človeka a AI	Úroveň 3: Pokročilá automatizácia
Úroveň 1A: Rozšírenie pre človeka	Úroveň 2A: Spolupráca medzi človekom a systémom AI	Úroveň 3A: Systém AI prijíma rozhodnutie a vykoná činnosť, pod dohľadom človeka
Úroveň 1B: Kognitívna pomoc človeku pri rozhodovaní a výbere úkonu	Úroveň 2B: Kolaborácia medzi človekom a systémom AI	Úroveň 3B: Systém AI prijíma rozhodnutie a vykoná činnosť, bez dohľadu človeka

7. Výsledky analýzy

Na základe tejto analýzy vieme s určitosťou povedať, že prediktívna údržba je veľkým posunom v oblasti údržby lietadiel. Oproti tradičným prístupom k údržbe sú jednoznačne viditeľné pozitívne prínosy tejto stratégie údržby pre civilné letectvo. Prediktívna údržba umožňuje lepšie a efektívnejšie plánovanie údržby, minimalizuje prestoje lietadiel vplyvom neplánovanej údržby a pomáha premeniť neplánovanú údržbu na plánované vykonanie údržby. Súčasný stav prediktívnej údržby opäť dokazuje jej pozitívne prínosy pre údržbu. Na trhu sú dostupné nástroje prediktívnej údržby, ktoré využívajú nové technológie a zložité výpočty na predpovedanie stavu komponentu. Objavujú sa aj nástroje, ktoré vo veľkom využívajú umelú inteligenciu a strojové učenie a vďaka kombinácii týchto technológií a skúseností z údržby od MRO a leteckých spoločností sú schopné efektívne predpovedať a odporučiť vykonať údržbu na komponentoch a systémoch lietadiel. Väčšina týchto nástrojov navyše podporuje monitorovanie celej flotily, čiže užívateľ vie do systému nahráť všetky lietadlá vo svojej flotile a vie ich monitorovať a spravovať na jednom mieste. Tieto nástroje sú plne digitálne a vo väčšine prípadov sú dostupné na akomkoľvek digitálnom hardvéri, čo takisto prispieva k maximálnej efektívnosti, keďže užívateľ tak môže spravovať svoju flotilu kedykoľvek a odkiaľkoľvek. Napriek veľkým výhodám, boli identifikované aj bariéry, ktoré bránia úspešnému širšiemu rozvoju prediktívnej údržby v civilnom letectve. Jedná sa o problémy väčšinou spojené s limitáciami, či už získavania údajov, ale nie až v takej veľkej miere ako spracovanie a ukladanie získaných údajov. Získavanie údajov v dnešnej dobe nepredstavuje až taký veľký problém. V lietadlách sa totiž už v dnešnej dobe nachádza veľké množstvo snímačov, ktoré poskytujú užitočné údaje. Samozrejme pre potreby prediktívnej údržby by bolo vhodné implementovanie ešte väčšieho množstva snímačov za účelom získania kvalitnejších a presnejších dát. Ideálnym riešením tohto problému by bola implementácia týchto snímačov už pri výrobe systémov a komponentov, čo je viac menej len otázka dohody medzi prevádzkovateľmi, výrobcami lietadiel a OEM. Väčší problém však predstavuje spracovanie a ukladanie týchto údajov. Väčšina leteckých spoločností a MRO totiž nedisponuje potrebnou digitálnou infraštruktúrou pre vykonávanie takýchto činností. Údaje, ktoré sú potrebné pre úspešné používanie

prediktívnej údržby majú veľmi veľký objem a súčasná digitálna infraštruktúra leteckých spoločností a MRO nie je pripravená na takto rozsiahle digitálne procesy a preto predstavuje zásadnú limitáciu pri jej úspešnom zavádzaní do praxe. Poskytovatelia nástrojov pre prediktívnu údržbu sa to snažia vyriešiť cloudovým úložiskom alebo externými servermi, ktoré by boli schopné uschovať takto veľké dáta. Následné spracovanie týchto údajov riešia výpočtovými modelmi, umelou inteligenciou a strojovým učením. Vo veľkom sú takisto využívané skúsenosti z údržby ale aj nehôd a incidentov, pri ktorých hrala rolu napríklad únava materiálu. Tieto skúsenosti sú následne kombinované s výpočtovými modelmi a umelou inteligenciou pre dosiahnutie čo najpresnejšej predpovede degradácie komponentu. Aj napriek už spomínaným pokrokovým technológiám a pozitívnym prínosom prediktívnej údržby, stále veľa ľudí plne nedôveruje prediktívnej údržbe a veľa odborníkov a ľudí z radov leteckých spoločností a MRO tvrdí, že na trhu zatiaľ nie je nástroj, ktorý by naplno využíval potenciál a prinášal výhody prediktívnej údržby, ktoré boli prezentované. Aj veľa používateľov súčasných nástrojov prediktívnej údržby tvrdí to isté, nespochybňujú však aj pozitívny prínos súčasných nástrojov. Civilnému letectvu to teda načrtáva aj obraz o budúcnosti prediktívnej údržby. Prediktívna údržba v budúcnosti bude nepochybne založená na umelej inteligencii a strojovom učení, keďže aktuálne nástroje ukazujú úspešnú využiteľnosť týchto technológií pre prediktívnu údržbu. V budúcnosti s vylepšenými verziami technológií umelej inteligencie, by tak využitie prediktívnej údržby mohlo priniesť očakávané výsledky a prínosy pre letectvo. Bude však potrebné myslieť aj na legislatívnu stránku veci. EASA aktívne skúma túto oblasť a vydáva odporúčania, aby bola zachovaná požadovaná miera bezpečnosti. Tento článok teda preukázal nepochybne pozitívne prínosy stratégie prediktívnej údržby pre letectvo, ale poukázal aj na bariéry pri jej zavádzaní, a že aj napriek prvým dostupným nástrojom, cesta za pravým potenciálom prediktívnej údržby bude ešte dlhá.

8. Záver

Prediktívna údržba v letectve predstavuje veľmi perspektívnu stratégiu údržby, ktorá má potenciál výrazne zmeniť a zefektívniť procesy spojené s údržbou a zvýšiť jej bezpečnosť, ako aj bezpečnosť leteckej dopravy. Na jej úspešné zavedenie je však potrebný komplexný prístup, či už z technického alebo legislatívneho hľadiska. Budúcnosť bude zohrávať kľúčovú úlohu pri preukazovaní výhod tejto stratégie údržby. Bude potrebná užšia spolupráca medzi zainteresovanými stranami. Letecké spoločnosti, MRO a OEM budú musieť spolupracovať na dohodách o implementácii dodatočných snímačov pri výrobe komponentov, pre presnejšie a efektívnejšie fungovanie prediktívnej údržby v budúcnosti. OEM bude musieť spolupracovať s leteckými spoločnosťami a MRO na dohodách o sprístupnení prevádzkových údajov, pre zabezpečenie dostatočnej transparentnosti a s tým súvisiacej efektívnejšej organizácii logistického reťazca a efektívnejšiemu využívaniu prediktívnej údržby. Rovnako bude potrebná užšia spolupráca medzi zainteresovanými stranami a regulačnými orgánmi, aby bola zabezpečená aj legislatívna stránka veci a bola zachovaná požadovaná miera bezpečnosti. Aj napriek bariéram brániacim využitiu stratégie prediktívnej údržby naplno, je prekonanie týchto bariér nevyhnutným krokom smerom k modernejším,

bezpečnejším, spoľahlivejším a efektívnejším stratégiám a postupom údržby v letectve.

Pod'akovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

[1] "Nariadenie - 1321/2014 - SK - EUR-Lex". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/1321/oj/slk>

[2] *L-8 Letová spôsobilosť lietadiel*. 2014. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://letectvo.nsat.sk/wp-content/uploads/sites/2/2014/07/L-8-Letová-sposobilost-lietadiel1.pdf>

[3] *L-6 Prevádzka lietadiel, II. časť: Všeobecné letectvo - Letúny*. 2014. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: [https://letectvo.nsat.sk/wp-content/uploads/sites/2/2014/07/L-6-Prevádzka-lietadiel-II.-časť-Všeobecné-letectvo-letúny1.pdf](https://letectvo.nsat.sk/wp-content/uploads/sites/2/2014/07/L-6-Prevadzka-lietadiel-II.-cast-Vseobecne-letectvo-letuny1.pdf)

[4] "Continuing Airworthiness | EASA". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/regulations/continuing-airworthiness>

[5] J. Rostáš, "Technológia údržby lietadiel",

[6] C. Teubert, A. A. Pohya, a G. Gorospe, "An Analysis of Barriers Preventing the Widespread Adoption of Predictive and Prescriptive Maintenance in Aviation", NASA Ames Research Center, NASA/TM-20230000841, 2023. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230000841/downloads/Teubert_An%20Analysis%20of%20Barriers%20Preventing%20the%20Widespread%20Adoption%20of%20Predictive%20and%20Prescriptive%20Maintenance%20in%20Aviation%20\(1\).pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230000841/downloads/Teubert_An%20Analysis%20of%20Barriers%20Preventing%20the%20Widespread%20Adoption%20of%20Predictive%20and%20Prescriptive%20Maintenance%20in%20Aviation%20(1).pdf)

[7] I. Stanton, K. Munir, A. Ikram, a M. El-Bakry, "Predictive maintenance analytics and implementation for aircraft: Challenges and opportunities", *Systems Engineering*, roč. 26, č. 2, s. 216–237, 2023, doi: 10.1002/sys.21651.

[8] "Airbus innovation for military aircraft inspection and maintenance | Airbus". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2019-05-airbus-innovation-for-military-aircraft-inspection-and-maintenance>

[9] "Are Predictive Maintenance Tools Falling Short? | Aviation Week Network". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://aviationweek.com/mro/emerging-technologies/are-predictive-maintenance-tools-falling-short>

[10] "Airplane Health Management (AHM) | Boeing Services". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://services.boeing.com/maintenance-engineering/maintenance-optimization/airplane-health-management-ahm>

[11] Boeing Commercial Aviation Services, "Airplane Health Management". The Boeing Company. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/commercial/services/assets/brochure/airplanehealthmanagement.pdf>

[12] "Insight Accelerator", Boeing Maintenance Engineering Services. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://services.boeing.com/maintenance-engineering/maintenance-optimization/insight-accelerator>

[13] "Insight Accelerator 2.0", Boeing Services - News. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://services.boeing.com/news/flight-data-analytics-news-2023-q1>

[14] "Maintenance Performance Toolbox", Boeing Maintenance Engineering Services. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://services.boeing.com/maintenance-engineering/maintenance-optimization/maintenance-performance-toolbox>

[15] "Skywise Core [X] | Airbus". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://aircraft.airbus.com/en/services/enhance/skywise-data-platform/skywise-core-x>

[16] "Impact | Airbus and Skywise", Palantir. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.palantir.com/impact/airbus/>

[17] "S. Fleet Performance + | Airbus". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://aircraft.airbus.com/en/services/enhance/skywise-digital-solutions/skywise-fleet-performance>

[18] "Airbus launches new Skywise eXperience to further extend digital platform | Airbus". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-11-airbus-launches-new-skywise-experience-to-further-extend-digital>

- [19] "Skywise graphic guidelines | Airbus". Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at:
<https://brand.airbus.com/en/guidelines/sub-identities/skywise>
- [20] "The MRO Lab - PROGNOS® - Predictive Maintenance". Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at:
<https://www.afiklmem.com/www.taag.com/solutions/about-prognos>
- [21] "The MRO Lab - PROGNOS® for Aircraft". Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at:
<https://www.afiklmem.com/www.taag.com/solutions/prognos-for-aircraft>
- [22] "The MRO Lab - Prognos® for Engine". Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at:
<https://www.afiklmem.com/www.taag.com/solutions/prognos-for-engine>
- [23] "The MRO Lab - Prognos® for APU". Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at:
<https://www.afiklmem.com/www.taag.com/solutions/prognos-for-apu>
- [24] "The MRO Lab - Prognos® for Inventory". Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at:
<https://www.afiklmem.com/www.taag.com/solutions/prognos-for-inventory>
- [25] "AVIATAR". Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at:
<https://www.lufthansa-technik.com/en/aviatar>
- [26] "Welcome to AVIATAR". Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.aviatar.com/en>
- [27] "Artificial Intelligence and Aviation | EASA". Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at:
<https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/artificial-intelligence-and-aviation-0>
- [28] "EASA Artificial Intelligence Concept Paper Issue 2 - Guidance for Level 1 & 2 machine-learning applications | EASA". Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at:
<https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-concept-paper-issue-2>
- [29] *Artificial Intelligence Roadmap: A human-centric approach to AI in aviation*. 2020. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at:
<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-AI-Roadmap-v1.0.pdf>



LETISKO M.R.ŠTEFÁNICA V BRATISLAVE A ROZVOJ DIAĽKOVÝCH LETOV

Patrik Mokoš
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Alena Novák Sedláčková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Until recently, long-haul flights from Bratislava were something unthinkable or unnecessary for many people. Nevertheless, from 2023 the airport has started servicing long-haul flights to distant exotic destinations such as the Dominican Republic, Vietnam or Cuba. Until then, passengers from the Slovak region usually chose one of the competing airports for this type of flight, such as Vienna, Budapest or Prague, which at that time, unlike Bratislava Airport, served long-haul flights. The original topic of the article and its aim was to propose a possible resumption of long-haul flights from Bratislava, at the time of the drafting of the assignment of this article long-haul flights from Bratislava were suspended, but during the drafting of the article their operation was resumed. The article therefore focuses on the development of long-haul flights from Bratislava, which requires a comprehensive view due to the airport's complicated position in terms of its geographical location in the region, categorisation, certification and economic performance. This article offers a complex insight for a certain proposals, based off of the information and data collected through the questionnaire. The significance of the article lies in the clarification of the issue of the development of long-haul flights from Bratislava airport and the provision of theoretical proposals for resolution of aspects influencing this development.

Keywords

Bratislava airport, airport, long-haul flight, development

1. Úvod

Letisko M. R. Štefánika v Bratislave (BTS) sa v roku 2023 stalo významným uzlom pre diaľkové lety, keď začalo ponúkať priame spojenia do exotických destinácií ako Dominikánska republika, Vietnam či Kuba. Tento krok zásadne ovplyvnil postavenie BTS v regióne, zlepšil jeho prestíž a rozšíril možnosti cestovania pre obyvateľov Slovenska.

Rozvoj diaľkových letov na BTS však nie je samozrejmosťou. Vyžaduje si komplexné zohľadnenie geografickej polohy, ekonomickej výkonnosti, infraštruktúrnych možností a konkurencie v regióne. Práve tieto faktory boli predmetom analýzy, doplnenej o prieskum verejnej mienky, ktorého cieľom bolo zistiť postoje cestujúcich k novým možnostiam diaľkového cestovania.

Článok ponúka pohľad na aktuálnu situáciu rozvoja diaľkových letov z Bratislavy, zhrňuje hlavné zistenia a predstavuje návrhy opatrení, ktoré by mohli pozitívne ovplyvniť budúci rast a atraktivitu BTS v tejto oblasti.

2. Metodika a metódy skúmania

Vypracovanie článku sa opieralo o kombináciu metód analýzy sekundárnych údajov a primárneho prieskumu. V prvej fáze bolo spracované rozsiahle spektrum odborných zdrojov, legislatívnych predpisov a štatistických údajov týkajúcich sa letiska M. R. Štefánika v Bratislave, ktoré vytvorili teoretický základ pre analýzu možností rozvoja diaľkových letov.

Praktická časť bola založená na prieskume verejnej mienky realizovanom formou dotazníka. Tento prieskum mal za cieľ identifikovať preferencie cestujúcich a ich pohľad na nové možnosti diaľkového cestovania z Bratislavy. Výsledky prieskumu boli následne spracované a interpretované so zameraním na hlavné trendy a očakávania respondentov.

Na základe poznatkov z teoretickej analýzy a výsledkov prieskumu boli formulované návrhy na podporu rozvoja diaľkových letov na BTS. Návrhy reflektujú potrebu posilnenia infraštruktúry, marketingovej komunikácie a rozšírenia spolupráce s leteckými dopravcami aj verejnými inštitúciami.

3. Teoretické východiská skúmania

Úvodná časť práce sa venovala analýze predpokladov pre rozvoj diaľkových letov na Letisku M. R. Štefánika v Bratislave. Hlavnou snahou bolo vytvoriť komplexný prehľad faktorov, ktoré ovplyvňujú možnosti rozšírenia diaľkových leteckých spojení v prostredí, kde je konkurencia iných stredoeurópskych letísk veľmi silná.

3.1. Charakteristiky a špecifická letiska

Analýza sa sústredila na hodnotenie infraštruktúrnych a prevádzkových parametrov bratislavského letiska. Kľúčovými prvkami boli dĺžky a kapacity vzletových a pristávacích dráh, vybavenosť terminálov, dostupnosť služieb a ročná kapacita cestujúcich. Zohľadnené boli aj certifikačné požiadavky, ktoré umožňujú obsluhu širokotrupých lietadiel využívaných na diaľkových letoch. Významnou súčasťou bolo posúdenie vstupného postavenia BTS do krajiny, ktoré je nevyhnutné pre zabezpečenie letov mimo Schengenského priestoru[1] [2].

3.2. Právne a ekonomické aspekty

Osobitná pozornosť bola venovaná legislatívnym rámcom upravujúcim prevádzku letísk, ako aj ich kategorizácii a certifikácii v zmysle európskych a medzinárodných noriem. V práci sa riešili požiadavky na bezpečnosť, environmentálne predpisy a administratívne procesy potrebné na zabezpečenie pravidelných diaľkových letov. Letiská musia spĺňať špecifické technické štandardy definované v predpise L14, ktorý vychádza

z ANNEXu 14 Medzinárodnej organizácie pre civilné letectvo (ICAO). Tento ANNEX obsahuje aj požiadavky na tzv. ICAO referenčný kód, ktorý určuje schopnosť letiska obsluhovať rôzne typy lietadiel. Pre širokotrupé lietadlá používané na diaľkové linky je štandardne vyžadovaný kód 4E. Letisko M. R. Štefánika (BTS) však v roku 2023 podľa svojej výročnej správy disponovalo kategóriou 4C, pričom bola udelená výnimka pre niektoré typy lietadiel charakteristických pre kategóriu 4E, aby mohli byť prevádzkované aj bez plného splnenia štandardu 4E.

Z ekonomického hľadiska bol skúmaný vplyv diaľkových liniek na príjmy letiska a jeho ekonomickú výkonnosť. Hodnotená bola aj konkurenčná pozícia BTS v porovnaní s okolitými letiskami, pričom bola zohľadnená spádová oblasť, dopyt cestujúcich a regionálne rozdiely v dostupnosti leteckých služieb. Po pandémie COVID-19 dochádza k postupnému rastu počtu cestujúcich na letisku Bratislava, čo pozitívne ovplyvňuje príjmovú stránku, avšak zároveň rastú aj prevádzkové náklady spojené so zabezpečením vyššieho objemu leteckých a súvisiacich služieb [3] [4] [5] [6].

3.3. Špecifika plánovania diaľkových letov

V teoretickej časti sa analyzovali aj špecifiká plánovania diaľkových letov, vrátane požiadaviek na flotilu, certifikáciu lietadiel na dlhé trasy (ETOPS), plánovania paliva a výberu vhodných leteckých trás. Na diaľkové lety sú tradične využívané širokotrupé lietadlá s dlhým doletom, ako napríklad Airbus A350 alebo Boeing 787 Dreamliner, ktoré umožňujú prepravu väčšieho počtu cestujúcich a nákladu na veľké vzdialenosti s vysokou efektívnosťou v porovnaní s úzkotrupými lietadlami. V súčasnosti však vďaka technologickému pokroku pribúda aj možnosť obsluhy diaľkových liniek úzkotrupými lietadlami s predĺženým doletom, ako sú napríklad Airbus A321XLR. Tieto stroje, hoci disponujú menšou kapacitou na počet cestujúcich a náklad v porovnaní so širokotrupými typmi lietadiel, predstavujú vhodné riešenie pre trasy s dlhým doletom, kde je dopyt po preprave nižší a kde by prevádzka väčších lietadiel nebola ekonomicky efektívna. Zdôraznená bola náročnosť zabezpečenia plynulosti letovej prevádzky nad rozľahlými oblasťami a význam efektívneho plánovania pre znižovanie nákladov letov [7] [8] [9].

4. Skúmanie možností rozvoja diaľkových letov

Rozvoj diaľkových letov na Letisku M. R. Štefánika v Bratislave predstavuje tému, ktorá si vyžaduje nielen teoretickú analýzu, ale aj dôkladné preskúmanie reálnych podmienok a názorov verejnosti. Praktická časť práce sa preto sústredila na kombináciu prieskumu verejnej mienky a návrhov konkrétnych opatrení na podporu tohto segmentu.

4.1. Zhrnutie hlavných faktorov ovplyvňujúcich rozvoj

Pred samotnou realizáciou prieskumu bolo potrebné zosumarizovať kľúčové poznatky z teoretickej časti. Medzi hlavné faktory, ktoré ovplyvňujú možnosti rozvoja diaľkových letov z BTS, patria najmä technická vybavenosť letiska vrátane dĺžok dráh a kapacity terminálov, legislatívne obmedzenia spojené s kategorizáciou a certifikáciou letiska, ekonomická výkonnosť a investičné plány letiskovej spoločnosti, ako aj

konkurenčné prostredie v regióne, predovšetkým blízkosť Letiska Schwechat vo Viedni.

Rovnako bolo identifikované, že existujú možnosti na využitie priaznivých aspektov, akými sú vstupné postavenie BTS do krajiny a narastajúci dopyt po exotických dovolenkových destináciách.

4.2. Prieskum verejnej mienky

4.2.1. Cieľ a forma prieskumu

Prieskum verejnej mienky bol zvolený ako hlavná metóda pre získanie pohľadu cestujúcich na novozavedené diaľkové lety z Bratislavy. Prieskum bol realizovaný formou dotazníka, ktorý bol distribuovaný online medzi respondentmi zo Slovenska, pričom cieľovou skupinou boli potenciálni cestujúci využívajúci BTS.

Dotazník bol štruktúrovaný tak, aby pokryl viaceré oblasti – znalosť ponuky diaľkových letov z BTS, ochotu využiť tieto lety, preferencie destinácií a očakávania spojené s letiskovými službami.

4.2.2. Výsledky prieskumu

Výsledky prieskumu naznačili, že väčšina respondentov vníma rozšírenie ponuky BTS o diaľkové lety pozitívne. Respondenti ocenili najmä možnosť priameho spojenia do exotických destinácií bez nutnosti prestupov cez väčšie letiskové „hub-y“. Medzi najžiadanejšie destinácie patrili dovolenkové destinácie, čo potvrdzuje správnosť výberu destinácií leteckou spoločnosťou World2Fly. Záujem bol však aj o diaľkové letecké linky do ekonomických centier ako napríklad New York či Šanghaj.

Viac ako polovica oslovených uviedla, že by v prípade stabilnej ponuky pravidelne využívala BTS pre diaľkové cesty, pričom kľúčovým faktorom ovplyvňujúcim rozhodovanie je doba dopravy cestujúcich z domova na letisko.

Na druhej strane, určité percento respondentov stále preferuje odlety z väčších letísk, najmä z Viedne, a to kvôli širšej ponuke liniek a stabilite letového poriadku.

4.2.3. Identifikované problémy a očakávania

Medzi najčastejšie pripomienky patrila potreba zvýšenia propagácie letov, lepšia informovanosť verejnosti a zlepšenie komfortu pri odbavovaní. Respondenti by ocenili aj väčší počet pravidelných diaľkových liniek a možnosť využitia väčších a komfortnejších lietadiel.

Zároveň bolo indikované, že dôvera v letisko ako v spoľahlivého partnera pre diaľkové lety je zatiaľ len čiastočná, a preto je nevyhnutné sústrediť sa nielen na samotnú ponuku letov, ale aj na budovanie pozitívneho pohľadu na BTS.

4.3. Návrhy pre podporu rozvoja diaľkových letov

4.3.1. Investície do infraštruktúry

Na základe výsledkov prieskumu aj analýzy aktuálneho stavu letiska je zrejmé, že rozvoj diaľkových letov si vyžaduje pokračovanie v modernizácii letiskovej infraštruktúry. Prioritou by mala byť optimalizácia terminálov pre väčší počet odbavovaných cestujúcich, zvýšenie komfortu čakacích priestorov a rozšírenie možností parkovania.

Dôležitým faktorom je aj zabezpečenie vysokého technického štandardu, ktorý je potrebný pre obsluhu moderných širokotrupých lietadiel, vrátane zlepšenia navigačných a bezpečnostných systémov.

4.3.2. Marketingové návrhy a propagácia

Jedným z hlavných problémov identifikovaných v prieskume bola nízka informovanosť verejnosti o možnostiach diaľkového cestovania z BTS. Letisko by malo zamerať svoje marketingové aktivity na cielenejšiu komunikáciu výhod a dostupnosti diaľkových letov, nielen v Bratislave, ale aj v širšom regióne Slovenska.

Zvýšenie povedomia môže byť dosiahnuté prostredníctvom spolupráce s cestovnými kancelárkami, kampaní v online priestore a využitím tradičných médií.

4.3.3. Posilnenie spolupráce s leteckými dopravcami

Kľúčovým prvkom budúceho rozvoja je prehĺbenie spolupráce s existujúcimi aj potenciálnymi leteckými partnermi. Rozšírenie ponuky diaľkových letov by malo byť podporené aktívnym vyjednávaním o nových linkách, najmä do obľúbených exotických destinácií a neskôr aj do hlavných svetových ekonomických centier.

Zároveň je potrebné vytvárať priaznivé podmienky pre letecké spoločnosti, ktoré zvažujú vstup na bratislavský trh, či už formou zliav na letiskových poplatkoch alebo formou spoločných marketingových kampaní.

5. Výsledky

Rozbor získaných údajov ukázal, že Letisko M. R. Štefánika v Bratislave má reálnu možnosť prejavíť sa ako významný hráč v oblasti diaľkových letov v regióne. Výsledky poukázali na viaceré dôležité trendy a súvislosti, ktoré sú kľúčové pre plánovanie ďalších krokov v rozvoji tejto oblasti.

5.1. Vnímanie diaľkových letov verejnosťou

Prieskum potvrdil vysokú mieru záujmu verejnosti o diaľkové lety z Bratislavy. Cestujúci pozitívne vnímajú možnosť priameho spojenia do exotických destinácií bez potreby prestupov na veľkých zahraničných letiskách. Tento fakt vytvára značný potenciál pre stabilizáciu dopytu v segmente rekreačných diaľkových letov, najmä počas zimnej sezóny.

Napriek tomu boli identifikované aj určité rezervy. Dôvera verejnosti v kvalitu a spoľahlivosť služieb bratislavského letiska zatiaľ nie je úplná. Časť respondentov vyjadrila obavy týkajúce

sa komfortu, dostupnosti služieb a stability ponuky destinácií. To naznačuje, že rozvoj diaľkových liniek nemôže byť založený len na ich zavedení, ale aj na systematickom budovaní pozitívneho vnímania letiska.

5.2. Vplyv na konkurencieschopnosť letiska

Analýza výsledkov ukázala, že rozšírenie ponuky diaľkových letov má potenciál posilniť postavenie BTS v konkurenčnom prostredí Slovenska. V porovnaní s dominantným Letiskom Schwechat vo Viedni ponúka BTS výhodu v kratšej dostupnosti pre slovenských cestujúcich.

Na druhej strane, konkurencia zo strany Viedne, Budapešti a Prahy zostáva silná, najmä pokiaľ ide o frekvenciu letov a šírku ponuky destinácií. Bratislavské letisko preto musí klásť dôraz na budovanie unikátnej ponuky – napríklad špecializáciu na vybrané exotické destinácie alebo nižšie ceny kombinované s vysokým štandardom služieb.

5.3. Identifikácia slabých miest

Výsledky tiež odhalili viacero slabých stránok, ktoré môžu rozvoj diaľkových letov limitovať:

- **Nízka frekvencia spojov:** Zatiaľ obmedzená na sezónne charterové lety, bez pravidelných celoročných liniek.
- **Obmedzená propagácia:** Nedostatočná informovanosť cestujúcich o existujúcich možnostiach a o výhodách cestovania z BTS.
- **Technické obmedzenia:** Hoci letisko spĺňa certifikačné požiadavky pre širokotrupé lietadlá, potreba ďalších investícií do infraštruktúry ostáva aktuálna, najmä ak sa má ponuka diaľkových letov rozšíriť.

5.4. Perspektívy ďalšieho rozvoja

Napriek identifikovaným problémom výsledky ukazujú, že potenciál pre rozvoj diaľkových letov z Bratislavy existuje. Kľúčom k úspechu bude postupné budovanie stabilnej ponuky, podpora dopytu vhodnými marketingovými aktivitami a systematická spolupráca s leteckými partnermi.

Osobitnú pozornosť si vyžaduje diverzifikácia ponuky – nielen destinácie pre dovolenkárov, ale aj priame spojenia do ekonomických centier sveta, čo by mohlo výrazne zvýšiť atraktivitu BTS aj pre cestujúcich využívajúcich služby leteckej dopravy za účelom práce či štúdia.

Vzhľadom na geografickú polohu Bratislavy, ktorá umožňuje jednoduché spojenie nielen pre slovenských, ale aj pre českých, rakúskych a maďarských cestujúcich, predstavuje rozvoj diaľkových letov významnú príležitosť na posilnenie regionálneho významu letiska.

6. Záver

Rozvoj diaľkových letov na Letisku M. R. Štefánika v Bratislave predstavuje tému s vysokým strategickým významom pre

budúcnosť samotného letiska aj regiónu ako celku. Výsledky analýzy naznačujú, že napriek viacerým objektívnym obmedzeniam existuje reálna šanca, aby sa BTS stalo atraktívnym bodom odletu nielen pre slovenských cestujúcich, ale aj pre obyvateľov širšieho stredoeurópskeho priestoru.

Realizovaný prieskum verejnej mienky ukázal, že medzi cestujúcimi existuje značný záujem o priame spojenia do exotických destinácií. Tento záujem, podporený vhodnými marketingovými aktivitami a stabilnou ponukou liniek, by mohol vytvoriť pevnú základňu pre udržateľný rast segmentu diaľkových letov. Významným zistením bolo aj to, že rozhodovanie cestujúcich ovplyvňujú nielen samotné destinácie, ale aj kvalita služieb na letisku, dostupnosť informácií a povest' letiska ako spoľahlivého partnera.

Analýza poukázala na viaceré faktory, ktoré budú kľúčové pre ďalší rozvoj. Medzi ne patrí najmä modernizácia letiskovej infraštruktúry, zvyšovanie komfortu pre cestujúcich, rozšírenie kapacít odbavovacích priestorov a ďalšie investície do technického zázemia, ktoré umožní obsluhu širokotrupých lietadiel aj pri vyšších objemoch dopravy.

Konkurencia zo strany veľkých medzinárodných letísk v regióne zostáva významnou výzvou. Preto bude nevyhnutné, aby BTS systematicky budovalo svoju špecifickú pozíciu – napríklad zameraním sa na vybrané trhy, poskytovaním atraktívnej cenovej politiky a ponukou spojení, ktoré budú pre cestujúcich priamo dostupné a časovo výhodné.

Zároveň je zrejmé, že rozvoj diaľkových letov si vyžaduje koordináciu medzi letiskovou spoločnosťou, leteckými dopravcami, cestovnými kancelárkami a verejnými inštitúciami. Len vzájomná spolupráca a dlhodobá stratégia umožní, aby sa potenciál, ktorý bratislavské letisko v oblasti diaľkových letov nepochybne má, naplno rozvinul.

Na základe získaných poznatkov možno konštatovať, že Letisko M. R. Štefánika má všetky predpoklady na to, aby sa stalo dôležitým bodom pre diaľkovú leteckú dopravu v regióne. Budúci úspech však bude závisieť od schopnosti identifikovať a efektívne využívať svoje silné stránky, popri systematickom odstraňovaní existujúcich slabín.

Rozvoj diaľkových letov z Bratislavy nie je len príležitosťou pre samotné letisko, ale aj pre celkové zvýšenie konkurencieschopnosti leteckej dopravy na Slovensku a posilnenie postavenia krajiny vo svete.

Referencie

- [1] "O letisku". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.bts.aero/o-letisku/o-spolocnosti/profil-spolocnosti/o-letisku/>
- [2] "História". [Online]. Available at: <https://www.bts.aero/o-letisku/o-spolocnosti/profil-spolocnosti/historia/>
- [3] S-EPI, "136/2004 Z. z. Zákon o letiskových spoločnostiach | Aktuálne znenie", Zákony pre ľudí. Cit: 24.

apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.zakonypreludi.sk/zz/2004-136>

[4] "Aerodromes | EASA". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/aerodromes>

[5] "Airport Charges". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.bts.aero/en/b2b/aviation-business/airport-charges/>

[6] "Bilaterálne dohody". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.mindop.sk/ministerstvo-1/doprava-3/civilne-letectvo/letecka-doprava/vykonavanie-pravidelnej-obchodnej-leteckej-dopravy-dohody/bilateralne-dohody>

[7] *Nariadenie Komisie (EÚ) č. 139/2014 z 12. februára 2014, ktorým sa stanovujú požiadavky a administratívne postupy týkajúce sa letísk podľa nariadenia Európskeho parlamentu a Rady (ES) č. 216/2008 Text s významom pre EHP*, roč. 044. 2014. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/139/oj/slk>

[8] "an14_1ed_1951.pdf". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: https://www.icao.int/APAC/Meetings/2015%20WAWG1/an14_1ed_1951.pdf

[9] "Analýza-pravných-predpisov.pdf". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.mfsr.sk/files/archiv/priloha-stranky/3293/20/Analýza-pravných-predpisov.pdf?utm>



MODERNIZÁCIA PODVOZKU LIETADLA STRATON D7

Vadim Nikonov
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This work focuses on the modernization of the landing gear of the Straton D7 aircraft, aiming to identify the shortcomings of the existing solution and to propose a technically more suitable alternative. The concept of the modernized landing gear was designed to meet technical requirements, manufacturing capabilities, and cost constraints. Analytical methods and simulation tools were employed to assess the behavior of the proposed landing gear under various types of loading. Based on the analysis, a concept was selected that achieves improvements in mechanical strength, component lifespan, and operational reliability. Issues present in the original design—such as difficulties during ground movement and limited parking options—were successfully eliminated. The modernized landing gear is ready for real-world application and provides a foundation for further development, testing, and eventual implementation into the Straton D7 aircraft.

Keywords

Airplane, Landing gear, Modernization, Analysis, Straton D7.

1. Úvod

Letecká technika sa neustále vyvíja a modernizácia jej jednotlivých častí je kľúčová pre zlepšenie bezpečnosti, spoľahlivosti a efektivity prevádzky. Jednou z najviac namáhaných častí ultralightových lietadiel je práve podvozok, ktorý zabezpečuje kontakt lietadla so zemou pri štarte, pristátí a pozjazde.

Hlavným cieľom je identifikovať nevýhody súčasného podvozkového riešenia, ktoré sa na lietadle aktuálne nachádza a vytvoriť návrh zlepšenia.

Navrhnuté riešenie bude následne overené pomocou výpočtov a simulačných analýz na vyhodnotenie pevnosti a správania sa podvozku pri rôznych zaťaženiach. Simulácie budú slúžiť ako základ pre posúdenie, či nová koncepcia spĺňa predpoklady pre lepšie vlastnosti ako pôvodný návrh.

Záverečným cieľom je zhodnotiť, či navrhnutá modernizácia reálne môže zlepšiť funkčné a bezpečnostné parametre podvozku a či je vhodná na implementáciu do reálnej prevádzky. Výsledky môžu vytvoriť predpoklad pre zavedenie modernizovaného podvozku do reálnej konštrukcie lietadla a jeho praktickú aplikáciu.

2. Metodika a metódy skúmania

V rámci modernizácie boli použité viaceré metódy s cieľom komplexne analyzovať mechanické správanie skúmaných materiálov a konštrukčných prvkov. Na úvod bola vykonaná archívna zbierka údajov, ktorá zahŕňala zhromažďovanie technickej dokumentácie, materiálových listov a výsledkov predchádzajúcich meraní a testov. Následne bola realizovaná analýza literatúry, zameraná na overenie vlastností vybraných materiálov a na identifikáciu vhodných výpočtových a simulačných prístupov.

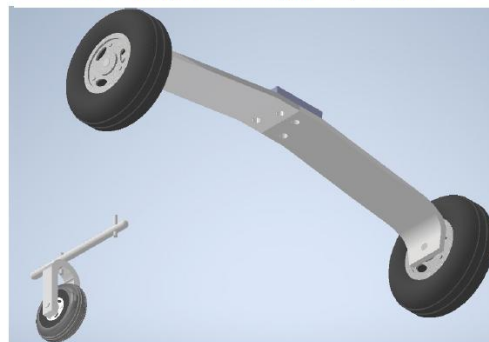
Ďalšou fázou boli numerické výpočty, ktoré zahŕňali stanovenie prevádzkového násobku a odhad maximálneho zaťaženia na základe známych prevádzkových podmienok. Tieto údaje boli ďalej využité pri simulačnom testovaní a to umožnilo vizualizáciu napätí (napr. podľa von Misesovho kritéria) a posunutí jednotlivých materiálov pri zaťažení. Simulácie boli vykonané pre štandardné aj extrémne podmienky (s násobkom 6,5), pričom výsledky boli vyhodnotené s ohľadom na bezpečnostné limity a správanie materiálu v kritických oblastiach.

3. Výsledky

Na základe stanovených parametrov boli zvolené materiály (Dural 2024-T3 a CFRP), spracované náčrty lietadla z rôznych pohľadov a výkresy súčiastok. Následne boli vytvorené 3D modely a vykonané skúšky pevnosti.



Obrázok 1 Konfigurácia ostrohoého podvozku - pohľad spredu



Obrázok 2 konfigurácia ostrohoého podvozku - pohľad zošikma

Pevnostné analýzy kompozitného a duralového podvozku preukázali, že navrhnutá konštrukcia spĺňa požiadavky na mechanickú odolnosť pri štandardnom zaťažení vlastnou váhou. Dôležité však zdôrazniť, že simulácia CFRP vychádza z predpokladu, že hlavné napätie je v smere vlákien kompozitu, čo výrazne zvyšuje medzu pevnosti materiálu. V prípade, že skutočné zaťaženie neodpovedá tomuto predpokladu, materiál nemusí spĺňať požadované bezpečnostné kritériá.

Oba materiály dostatočne prenášajú prevádzkové zaťaženie s aplikovaným bezpečnostným násobkom, čo svedčí o tom, že navrhnutý podvozok odoláva zaťaženiu bez neprijateľných deformácií. Všetky vypočítané hodnoty napätia sú výrazne pod medzou klzu materiálov.

4. Záver

Návrh podvozku bol podrobený výpočtom a simulačným analýzami, ktoré umožnili overiť jeho správanie pri rôznych typoch zaťaženia. Výsledky týchto analýz preukázali, že modernizované riešenie vykazuje zlepšenie v kľúčových oblastiach, pričom boli eliminované aj niektoré známe problémy pôvodného riešenia.

Na základe vykonanej analýzy a simulačných výstupov možno konštatovať, že modernizovaný podvozok predstavuje perspektívne riešenie, ktoré môže byť aplikované v reálnej prevádzke. Tento návrh vytvára pevný základ pre ďalší vývoj, praktické overenie a prípadnú inštaláciu na lietadlo Straton D7.

V rámci vykonanej analýzy sa zistilo, že niektoré aspekty, ako napríklad použitie špeciálnych materiálov a testovanie podvozku v rôznych environmentálnych podmienkach, si zaslúžia ďalšiu pozornosť. Tieto faktory by bolo vhodné podrobnejšie preskúmať v budúcich výskumoch, ktoré môžu zahŕňať aj reálne testovanie prototypu v letových podmienkach.

Referencie

- [1] <https://www.airwar.ru/enc/glider/ls3.html> [cit. 19.04.2025]
- [2] <https://www.studyaircrafts.com/landing-gear-system> [cit. 19.04.2025]
- [3] https://sk.wikipedia.org/wiki/Boeing_CH-47_Chinook [cit. 19.04.2025]
- [4] https://ru.wikipedia.org/wiki/Mooney_M20 [cit. 19.04.2025]
- [5] Bereket Sitotaw Kidane, „Design and Analysis of Light GA Aircraft for Agricultural Purpose“, 2016
- [6] <https://www.jetphotos.com/photo/10187791> [cit. 19.04.2025]
- [7] <https://www.jetphotos.com/photo/9648480> [cit. 19.04.2025]

- [8] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airbus-owned_A380-800_%28F-WWDD%29_at_Filton_Airfield_%28England%29_in_mid-2010_arp.jpg [cit. 19.04.2025]
- [9] <https://magnetpress.online/aerohobby/ultralehke-motorove-kluzaky-oldricha-olsanskeho/> [cit. 19.04.2025]
- [10] D. P. Raymer „Aircraft Design: A Conceptual Approach“, 2012
- [11] Praveen Kumar Balguri, Pragadheswaran Sekar „Conceptual design and linear static analysis of nose landing gear“, 2015
- [12] Robert Kyle Schmidt „The Design of Aircraft Landing Gear“, 2016
- [13] Norman S. Currey „Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices“, 1988
- [14] Ondrej Samuel Tomášik, bakalárska práca „Návrh podvozku súťažného bezpilotného letounu“, 2023
- [15] Jakub Gebrlín, bakalárska práca „návrh podvozku súťažného modelu letadla“, 2019
- [16] Bereket Sitotaw Kidane „Design and Analysis of Light GA Aircraft for Agricultural Purpose“, 2016
- [17] Filip Škultéty „Lietadlá 1. Teória a konštrukcia“, 2022
- [17] <https://magazin.autobazar.eu/revolucny-kompozit-znizenie-hmotnosti-karoserie-o-50-cena-9-kg-clanok5462.html>? [cit. 19.04.2025]
- [18] <https://www.laacr.cz/predpisy/ul-2-cast-i/> [cit. 19.04.2025]
- [19] <https://hlinik.cz/produkty/hlinikove-plechy-a-desky/2024-2/> [cit. 19.04.2025]
- [20] <https://sk.lksteelpipe.com/news/a-brief-induction-of-super-duralumin-2024-t3-t-41190147.html> [cit. 19.04.2025]
- [21] <https://premiumalu.com/ru/%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE-%D0%BF%D0%BE-%D0%B8%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8E-%D0%B0%D0%BB%D1%8E%D0%BC%D0%B8%D0%BD/> [cit. 19.04.2025]
- [22] Doc. Ing. Ľudovít Naď, CSc., Ing. Anton Bajcezer „BETON • TECHNOLOGIE • KONSTRUKCE • SANACE“ článok zo str. 54, 2006
- [23] H – L. Ved. red. A. Jarošová – K. Buzássyová. Kolektív autorov: M. Avramovová, L. Balážová, M. Čierna, J. Hašanová, B. Chocholová, N. Janočková, A. Jarošová, J. Končalová, M. Kováčová, L. Ocetová, A. (Adriana) Oravcová, A. (Anna) Oravcová, M. Petrufová, E. Porubská, A. Šebestová, A. Šufliarska, D. Zvončeková. „Slovník súčasného slovenského jazyka.“, 2011



ANALÝZA VYUŽITIA LIETADIEL ĽAHŠÍCH AKO VZDUCH NA OBCHODNÚ LETECKÚ PREVÁDZKOVÚ ČINNOSŤ A ANALÝZA PRECHODU LIETADIEL ĽAHŠÍCH AKO VZDUCH Z PILOTOVANÝCH NA BEZPILOTNÉ

Marek Sabadoš
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Andrej Novák
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This bachelor thesis includes a breakdown of definitions related to the classification of aircraft, primarily into lighter-than-air and heavier-than-air categories. The theoretical section focuses on the history and development of lighter-than-air aircraft. The next section discusses the technological challenges and regulatory requirements for transitioning from manned to unmanned lighter-than-air aircraft. In the final section, the economic efficiency and environmental impact of lighter-than-air aircraft are compared with heavier-than-air aircraft. The Skyship 600 and Cessna 208B Grand Caravan G1000 are specifically compared. Lastly, we assess these aircraft in the context of photogrammetry, forest liming, and environmental monitoring of habitats.

1. Úvod

Letecká doprava je jeden z najrýchlejších sa rozvíjajúcich odvetví dopravy. Vďaka rastúcej spoľahlivosti, zvyšovaniu kvality a rýchlosti, je schopná prepraviť cestujúcich alebo tovar z jedného miesta na druhé. Našla si svoje využitie aj v rôznych odvetviach leteckých prác, ako sú poľnohospodárstvo, priemysel, kartografia, geodézia alebo pri monitorovaní životného prostredia a veľa iných.

V teoretickej práci si povieme o definíciách týkajúcich sa rozdelenia lietadiel, na lietadlá ľahšie ako vzduch a lietadlá ťažšie ako vzduch. Budeme sa zaoberať aj historickým vznikom a vývojom lietadiel ľahších ako vzduch.

V praktickej časti si identifikujeme technologické výzvy a regulačné požiadavky potrebné na bezpečný a efektívny prechod z pilotovaných lietadiel na bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch. Povieme si tu o materiáloch a konštrukciách, energetickej efektívnosti a výdrži lietadiel ľahších ako vzduch, prispôbení sa bezpilotných lietadiel ľahších ako vzduch legislatívnym a certifikačným požiadavkám, z dôvodu ich integrovania do riadenej leteckej prevádzky.

V poslednej časti práce posúdime ekonomickú efektívnosť a environmentálny vplyv používania lietadiel ľahších ako vzduch v komerčnej doprave, v porovnaní s tradičnými lietadlami. Pozrieme sa na letecké práce a ich kategorizáciu. Následne porovnáme lietadlo ľahšie ako vzduch Skyship 600 s lietadlom ťažším ako vzduch Cessna 208B Grand Caravan G1000. Zameriame sa na ich spoločné vlastnosti, prečo boli vybrané tieto dva typy lietadiel a porovnáme ich z rôznych hľadísk. Nakoniec porovnáme tieto lietadlá v praxi, konkrétne v oblasti fotogrametrie, vápnení lesov a environmentálneho monitorovania biotopov.

2. Metodika a metódy skúmania

2.1. Analýza a vývoj lietadiel ľahších ako vzduch

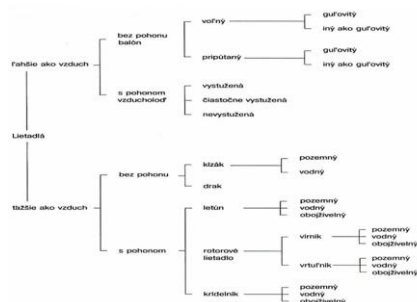
V tejto kapitole si povieme o definíciách základných kategórií lietadiel, kde si spomenieme rozdelenie lietadiel na ľahšie a ťažšie ako vzduch. Rozdelíme si lietadlá ľahšie ako vzduch, podľa možnosti voľného pohybu v atmosfére a prítomnosti posádky na palube.

2.1.1. Definície základných kategórií lietadiel

Lietadlo je zariadenie schopné pohybu v atmosfére pomocou iných reakcií, ako sú reakcie vzduchu so zemským povrchom. Základná definícia môže byť rozšírená o vykonávanie bezpečných vzletov a pristátí pri čiastočnej riaditeľnosti či schopnosti prepravy osôb a nákladu. [1]

Podľa princípu generovania vztlakovej sily delíme lietadlá na:

- **Lietadlá ľahšie ako vzduch**
- **Lietadlá ťažšie ako vzduch**



Obrázok 1: Delenie lietadiel podľa generovania vztlakovej sily, zdroj: [1]

Lietadlá ľahšie ako vzduch sú telesá s menšou hmotnosťou ako je hmotnosť vzduchu nimi vytlačeného. Pohybujú sa v atmosfére prostredníctvom aerostatického vztlaku, ktorý pomáha prekonať tiažovú silu. Archimedov zákon tvrdí, že veľkosť aerostatickej vztlakovej sily sa rovná tiaži rovnakého objemu vzduchu ako je objem lietadla. [1]

Lietadlá ťažšie ako vzduch využívajú aerodynamickú vztlakovú silu, alebo pôsobenia iných síl ako sú u raketového motora reakčné účinky plynov, či pomocou vytvoreného silového poľa, na pohyb lietadiel v atmosfére. [1]

Balón je lietadlo ľahšie ako vzduch bez pohonu, schopné pohybu v atmosfére pomocou Archimedovho zákona, kde sa veľkosť aerostatickej vztlakovej sily rovná tiaži rovnakého objemu vzduchu ako je objem lietadla. Skladá sa z vlastného balóna plneného plynom, ktorý je ľahší ako vzduch alebo horúcim vzduchom, závesných lán a koša. [1]

Vzducholod' je motorové lietadlo ľahšie ako vzduch. Má zvyčajne aerodynamický tvar. Vzducholode sa rozdeľujú podľa konštrukcie na nevystužené, polovystužené a vystužené. [1]

2.1.2. Rozdelenie vzducholodí podľa konštrukcie

Nevystužené vzducholode sú typom vzducholodí, známym aj ako „blimps“, predstavujú technicky najmenej náročný typ vzducholodí. Ich tvar je udržiavaný pomocou vnútorného pretlaku nosného plynu, pričom nemajú pevnú nosnú kostru. Aerodynamické vlastnosti tohto typu vzducholodí ovplyvňuje tlakový rozdiel medzi vnútorným a vonkajším prostredím balóna. [2]

Polovystužené vzducholode predstavujú optimalizáciu nevystužených vzducholodí. Ich tvar je udržiavaný pomocou vnútorného pretlaku nosného plynu a sú vybavené pevnou konštrukciou, najčastejšie vo forme kýlu. Tento typ konštrukcie zvyšuje stabilitu a zlepšuje aerodynamické vlastnosti a zabezpečuje prepravu ťažších nákladov. [2]

Vystužené vzducholode majú pevnú nosnú kostru, väčšinou vyrobenú z hliníkových, alebo duralových zliatin. Tvar vzducholode je udržiavaný bez závislosti od vnútorného tlaku nosného plynu. V porovnaní s nevystuženými a polovystuženými vzducholodami si udržia aerodynamický profil aj pri strate nosného plynu. Výhodou konštrukcie je vysoká nosnosť a stabilita, čo umožní prepravu ťažkých nákladov a letov na veľké vzdialenosti. [2]

2.1.3. Rozdelenie lietadiel ľahších ako vzduch vzhľadom k možnosti voľného pohybu vo vzduchu

Upútané lietadlá ľahšie ako vzduch sú balóny a vzducholode upevnené lanom, alebo káblom k zemi, či k inému objektu. Upevnenie im zamedzí voľný pohyb vo vzduchu, ale umožňuje im stúpanie a klesanie na jednom mieste. [3]

Neupútané lietadlá ľahšie ako vzduch sú balóny a vzducholode, ktoré sa voľne pohybujú v atmosfére. [3]

2.1.4. Rozdelenie lietadiel ľahších ako vzduch vzhľadom k prítomnosti posádky na palube

Pilotované lietadlá ľahšie ako vzduch sú balóny a vzducholode, ktoré majú na palube pilota alebo posádku, ktorá zabezpečí riadenie letu. [4]

Bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch sú balóny a vzducholode, ktoré nemajú na palube pilota alebo posádku. Sú riadené autonómne na diaľku alebo sa pohybujú pasívne podľa vetra. [4]

2.2. Analýza prechodu lietadiel ľahších ako vzduch z pilotovaných na bezpilotné

V tejto kapitole si povieme o regulačných požiadavkách pri prechode z bezpilotných na pilotované lietadlá ľahšie ako vzduch. Budeme sa opierať o leteckú certifikáciu a legislatívu a na záver si nájdeme spôsoby využitia bezpilotných lietadiel ľahších ako vzduch v praxi.

2.2.1. Letecká certifikácia a legislatíva

Regulácie bezpilotných lietadiel ľahších ako vzduch by mali vychádzať už z existujúcich predpisov, ktoré sa vzťahujú tiež na pilotované lietadlá ľahšie ako vzduch. V Európe sú to pravidlá agentúry EASA (Európska agentúra pre bezpečnosť letectva), v USA zabezpečuje bezpečnosť vzdušného priestoru agentúra FAA (Federálna správa letectva). [5] [6]

Súčasný regulačný rámec sú prevažne orientované na pilotované lietadlá ľahšie ako vzduch, zatiaľ čo bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch sú v legislatívnej „šedej zóne“, znamená to, že neexistujú zreteľné pravidlá pre túto oblasť. Bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch sú spôsobilé leteckej prevádzky, ale súčasný pravidlá a predpisy neberú do úvahy autonómne riadenie a ich špecifické prevádzkové vlastnosti. [6] [5]

2.2.2. Príklady regulácií

V Európskej únii prevádzka bezpilotných prostriedkov je uvedená podľa Nariadenia EÚ 2019/947. V tomto nariadení sú bezpilotné prostriedky rozdelené do otvorenej, osobitnej a osvedčenej kategórie. [7]

V otvorenej kategórii nie je požadované predchádzajúce povolenie príslušného orgánu, ani prehlásenie prevádzkovateľa bezpilotného leteckého systému pred vykonaním prevádzky, s ohľadom na súvisiace riziká. [7]

V osobitnej kategórii je potrebné prevádzkové povolenie Dopravného úradu, pred vykonaním prevádzky. Toto povolenie potrebuje prevádzkovateľ, ktorý plánuje vykonať let, ktorý nespĺňa niektorú z požiadaviek otvorenej kategórie. [7]

V osvedčenej kategórii je povolená prevádzka bezpilotných systémov, pri ktorých je s ohľadom na súvisiace riziká potrebná certifikácia UAS, podľa článku 40 ods. 1 písm. a), b) a c) delegovaného nariadenia (EÚ) 2019/945 a osvedčenie prevádzkovateľa, a prípadne aj udelenie preukazu spôsobilosti pilotovi na diaľku Dopravným úradom, aby bola zaistená zodpovedajúca úroveň bezpečnosti. [7]

Bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch by bolo rozumné zaradiť do osvedčenej kategórie, vzhľadom k ich vyššiemu riziku a technickej komplexnosti. Vďaka špecifickým vlastnostiam je potrebné testovanie v náročných podmienkach pred integráciou bezpilotných lietadiel ľahších ako vzduch do vzdušného priestoru. Bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch, by mohli požadovať vlastnú podkategóriu v osvedčenej kategórii, ktorá by obsahovala požiadavky na technickú certifikáciu, verifikáciu systémov a špecifické bezpečnostné normy. Týmto spôsobom by sa zabezpečila integrácia bezpilotných lietadiel ľahších ako vzduch do leteckej prevádzky. [7]

V Spojených štátoch amerických sú bezpilotné lietadlá definované podľa agentúry Federal Aviation Administration (FAA) v časti 107. V tomto predpise sú definované bezpilotné lietadlá, ktoré sa používajú v leteckej prevádzke do maximálnej vzletovej hmotnosti 25kg. V tejto časti nie sú spomenuté bezpilotné lietadlá s maximálnou vzletovou hmotnosťou nad 25kg, a taktiež v tejto časti nie sú spomenuté špecifické letové charakteristiky lietadiel ľahších ako vzduch. Bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch s maximálnou vzletovou hmotnosťou nad 25kg, si môžu zažiadať o individuálne výnimky, alebo špeciálne certifikáty (Certificate of Waiver). Bolo by rozumnejšie vytvoriť osobitný regulačný rámec pre bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch, alebo nájsť alternatívu ich zaradenia do inej kategórie v rámci agentúry FAA. [8] [5]

2.2.3. Spôsoby využitia bezpilotných lietadiel ľahších ako vzduch v leteckej prevádzke

Bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch sú schopné spoľahlivo monitorovať dianie na zemi bez potreby častého pristávania, dotankovania alebo manuálneho zásahu operátora. Uplatňujú sa vo viacerých leteckých prácach. Jedným z najtypickejších príkladov je monitorovanie a prieskum územia. Bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch vďaka stabilnému letu a s možnosťou uniesť senzory či kamery, vynikajú svojimi schopnosťami v tejto oblasti, dokážu efektívne zbierať údaje o kvalite ovzdušia, a vedú zachytiť detailné zábery krajiny.

Potenciál môžu naplniť aj v oblasti, kde je nutné dlhodobo sledovať zmeny v ekosystéme, ako napríklad pri výskume kyslíka pôdy alebo lesov. Dokážu preletieť nad územím a monitorovať podmienky z výšky, čo je výhodné na miestach, kde by tradičné lietadlá boli rušivé, alebo by boli príliš finančne náročné. V odvetví záchranných a humanitárnych misií dokážu rýchlo zmapovať zasiahnuté oblasti a poskytnúť dôležité a aktuálne informácie o danej situácii. Pomôžu identifikovať poškodenú infraštruktúru a uľahčiť prácu záchranným tímom, ktorí potrebujú konať rýchlo a presne.

2.3. Analýza využitia lietadiel ľahších ako vzduch na obchodnú leteckú prevádzkovú činnosť

V tejto kapitole si povieme o leteckých prácach a ich kategorizácii, spomenieme si ako sa využívajú lietadlá ľahšie ako vzduch v daných leteckých prácach. Neskôr prejdeme na porovnanie lietadiel ľahších ako vzduch s lietadlami ťažšími ako vzduch, konkrétne to bude porovnanie medzi Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan G1000. Dané lietadlá budú popísané a následne porovnané z rôznych hľadísk. Na záver si porovnáme tieto dve lietadlá v praxi, konkrétne vo

fotogrametrii, pri výskume lesov a environmentálnom monitorovaní biotopov.

2.3.1. Letecké práce a ich kategorizácia

Letecké práce sú aktivity, pri ktorých sa využívajú lietadlá na rôzne komerčné, priemyselné a vedecké účely. Cieľom leteckých prác je poskytovanie služieb na miestach, kde sú lietadlá najrýchlejšou, alebo jedinou možnou voľbou. Medzi tieto práce patria napríklad: poľnohospodárske práce, práce v oblasti priemyslu, fotografovanie a snímkovanie, geodetické a kartografické práce, pozorovanie a hľadkovacie lety, pátracie a záchranné operácie, reklama a médiá, a tiež preprava nákladu a osôb. Letecké práce sú definované v Annexe 6 ICAO, ktorý reguluje civilné letectvo a vykonávanie leteckých prác. Vyžadujú si špecifické predpisy a povolanie vzhľadom na ich riziká a technické nároky. [6]

2.3.2. Porovnanie ľahších a ťažších lietadiel ako vzduch v oblasti leteckých prác

Pre porovnanie lietadiel ľahších ako vzduch a ťažších ako vzduch, je potrebné zvoliť vhodné typy lietadiel z oboch kategórií, ktoré umožnia čo najpresnejšie porovnanie prevádzkových, technických a aj ekonomických aspektov. Ako zástupca kategórie lietadiel ľahších ako vzduch bola zvolená vzducholod' Skyship 600. Ako predstaviteľ kategórie lietadiel ťažších ako vzduch bola vybraná Cessna 208B Grand Caravan G1000. V tejto podkapitole budú predstavené vybrané druhy lietadiel, následne si povieme o spoločných parametroch, ktoré odôvodňujú ich výber. Nakoniec porovnáme tieto lietadlá z technického, ekonomického, environmentálneho hľadiska a z pohľadu prevádzkových postupov. Cieľom tohto porovnania je posúdiť ekonomickú efektívnosť a environmentálny vplyv, používania lietadiel ľahších ako vzduch v komerčnej leteckej doprave v porovnaní s tradičnými lietadlami.

Tabuľka 1: Spoločné vlastnosti lietadiel Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan G1000

Parametre na porovnanie	Skyship 600	Cessna 208B Grand Caravan G1000
Maximálna kapacita osôb	1 pilot + 12 cestujúci	1 pilot + 14 cestujúci
Užitočné zaťaženie (kg)	~ 1000 - 1200	~ 1400 - 1600
Prevádzka v regionálnej leteckej doprave	Áno	Áno
Súčasný komerčný využitie	Áno	Áno

Ako môžeme vidieť v tabuľke, Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan sú dva rozdielne typy lietadiel, avšak majú toho veľa spoločného. Oba typy lietadiel sa dajú využiť v podobných oblastiach, majú podobný počet pasažierov na palube a porovnateľné užitočné zaťaženie. Tieto dva typy lietadiel nám poskytnú dobrý základ na porovnanie ich výhod a nevýhod z rôznych pohľadov, či ide o porovnanie z ekonomického,

technického a environmentálneho pohľadu, alebo v rôznych leteckých prácach.

Tabuľka 2: Technické rozdiely lietadiel Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan G1000

Parameter	Skyship 600	Cessna 208B Grand Caravan G1000
Dĺžka (m)	59	12,7
Rozpätie krídel (m)	----- -----	15,88
Výkon motora (hp)	328	680
Typ paliva	AVGAS	Jet-A1
Plniaci plyn	Hélium	----- -----
Max. vzletová hmotnosť (kg)	5700	3992
Max. letová rýchlosť (km/h)	94	340
Cestovná rýchlosť (km/h)	80	270
Dolet (km)	400	1786
Vytrvalosť letu (hod)	24	6

Ako môžeme vidieť v tabuľke, rozdiely medzi lietadlom ľahším ako vzduch a ťažším ako vzduch sú viditeľné hlavne v rýchlosti, vytrvalosti vo vzduchu a dolete. Skyship 600 je síce pomalšia a má kratší dolet, no jej veľkou výhodou je zotrvanie vo vzduchu až na 24 hodín bez prestávky, to z nej robí ideálny prostriedok pre dlhodobé monitorovacie misie, kde nie je cieľom dosiahnuť cieľ čo najrýchlejšie, ale zotrvať nad ním čo najdlhšie.

Na druhej strane Cessna 208B Grand Caravan G1000 dosahuje vyššiu letovú rýchlosť a dlhší dolet, čo je ideálne na rýchle presuny. Aj keď sú tieto lietadlá technicky odlišné, môžu vykonávať podobné úlohy pri monitorovacích letoch. Každé z uvedených lietadiel má svoje výhody a nevýhody, ktoré závisia od konkrétnych požiadaviek pre danú leteckú prácu.

Tabuľka 3: Porovnanie lietadiel Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan G1000 z ekonomického hľadiska

Parametre	Skyship 600	Cessna 208B Grand Caravan G1000
Priemerná spotreba paliva (l/h)	47,8	33
Cena paliva za liter (€)	~ 2,20 (AVGAS)	~ 2,20 (Jet-A1)
Cena plniaceho plynu (€)	~ 15 (Hélium)	----- -----

Palivové náklady na 100km (€)	~ 112	~ 33
Servis a údržba (€/hod)	~ 250	~ 125
Náklady na 100km (palivo + servis)	~ 300	~ 88
Špecifický dolet (km/l)	~ 0,47	~ 0,63

V tejto tabuľke môžeme vidieť, že lietadlo ľahšie ako vzduch Skyship 600 nepredstavuje cenovo najvýhodnejšie riešenie, najmä kvôli cene hélia a náročnejšej údržbe. Na druhej strane Cessna 208B Grand Caravan G1000 je ekonomicky výhodnejším typom, jeho údržba je jednoduchšia a oproti Skyship 600 je lietadlo efektívnejšie. Môžeme si to všimnúť na nižších nákladoch na 100 kilometrov a doletovej efektivitě na 1 kilometer.

Tabuľka 4: Porovnanie lietadiel Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan G1000 z environmentálneho hľadiska

Parametre	Skyship 600	Cessna 208B Grand Caravan G1000
Emisie hluku (db)	~ 70	~ 85
Emisie CO2 (g/km)	50-80	~ 143
Emisie CO2 na 100km (g)	125-200	300

Z tabuľky vyplýva, že lietadlo ľahšie ako vzduch dosahuje nižšie emisie hluku a CO2, čo je vhodnejšie pre misie v oblastiach s environmentálnymi reguláciami alebo v blízkosti obývaných oblastí. Cessna 208B Grand Caravan G1000 generuje vyššie emisie oxidu uhličitého a vyššie emisie hluku, ale stále spĺňa väčšinu noriem v oblastiach s environmentálnymi reguláciami.

Tabuľka 5: Porovnanie prevádzkových vlastností lietadiel Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan G1000

Parametre	Skyship 600	Cessna 208B Grand Caravan G1000
Minimálna dĺžka pristávacej dráhy	Krátke plochy	800 m
Prevádzka deň/noc	Obmedzená nočná prevádzka	Vhodné
Vhodné pre VFR/IFR	Obmedzené pre IFR	Áno
Vhodné pre IMC/VMC	Obmedzené pre IMC	Áno
Výdrž na mieste (Hover time)	Až 24 hodín	Nemá schopnosť zotrvať na mieste

Manévrovateľnosť na zemi	Vysoká	Obmedzená
Prevádzka na nespevnených plochách	Vhodná	Vyžaduje viac priestoru
Meteorologické obmedzenia	Citlivé na silný vietor	Odolné proti silnému vetru
Vysoké teploty	Znížený výkon pri vysokých teplotách	Schopné operovať pri vysokých teplotách
Maximálna letová výška (ft)	6561	25 00

Z tabuľky vyplýva, že Skyship 600 má výhodu v schopnosti vznášať sa nad jedným miestom na dlhý čas. Taktiež lietadlo ľahšie ako vzduch zvláda štart z kratších a menej upravených plôch. Na druhej strane Skyship 600 je obmedzená pri nočnej prevádzke a nevhodných meteorologických podmienkach.

3. Výsledky

Po dokončení všetkých porovnaní si môžeme povedať, že lietadlá Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan G1000 predstavujú dva odlišné, ale prínosné k odvetviu leteckých prác. Každé z uvedených lietadiel je vhodné na iný štýl operácie, iné prostredie a špecifické potreby. V nasledujúcich tabuľkách si zhrnieme výhody a nevýhody oboch lietadiel.

Tabuľka 6: Výhody a nevýhody lietadla Skyship 600

Výhody	Nevýhody
Nízke emisie hluku	Nízka cestovná rýchlosť
Nízke emisie CO ₂	Vysoké náklady na hélium a údržbu
Možnosť zotrvať na mieste až na 24 hodín	Vysoká citlivosť na meteorologické javy
Výborná manévrovateľnosť na zemi	Obmedzená nočná prevádzka
Prevádzka z krátkych a neupravených plôch	Obmedzená IFR prevádzka
Vhodná na dlhodobé monitorovanie	Nižšia letová výška a menší dolet

Skyship 600 je vhodná na miesta, kde je potrebné zotrvať na jednom mieste na dlhší čas, je schopná vznášať sa nad cieľom a zabezpečiť dostatok priestoru a času na monitorovanie alebo meranie. Taktiež je tichá, neprodukuje takmer žiadne emisie a je vhodnejšia na lety nad národnými parkami, prírodnými rezerváciami, mestami alebo pri sledovaní environmentálnych javov. Nevyžaduje upravené letisko, tomuto typu lietadla stačí trávnatá plocha alebo menšia rovná časť terénu. Má veľkú prevádzkovú flexibilitu. Lietadlo ľahšie ako vzduch je pomalšie, má kratší dolet a je náchylné na zlé meteorologické podmienky, ktoré ju dokážu vyradiť z prevádzky, oproti lietadlu ťažšiemu ako

vzduch. Prevádzka Skyship 600 je drahšia najmä kvôli nákladom na hélium a údržbu.

Tabuľka 7: Výhody a nevýhody lietadla Cessna 208B Grand Caravan G1000

Výhody	Nevýhody
Vysoká cestovná rýchlosť	Vyššie emisie hluku
Dolet a vyššia letová výška	Vyššie emisie CO ₂
Nižšie palivové a servisné náklady	Obmedzená prevádzka mimo upravených plôch
Schopnosť IFR a IMC letov	Nemá schopnosť zotrvať na mieste
Vhodné pre nočné lety	Menšia flexibilita na zemi
Odolnosť voči nepriaznivému počasiu	Nižšia maximálna vzletová hmotnosť

Cessna 208B Grand Caravan G1000 je rozšírený a spoľahlivý typ lietadla ťažšieho ako vzduch, ktorý je vhodný na rôzne letecké práce. Výhodou tohto typu lietadla je, že dokáže lietať rýchlo a aj za menej priaznivého počasia. Toto lietadlo je schopné letu vo dne aj v noci, pri podmienkach IFR aj IMC. Údržba je jednoduchšia a lacnejšia ako pri lietadle ľahšie ako vzduch. Nevýhodou Cessna 208B Grand Caravan je, že nie je schopné zotrvať na mieste, ale ak je to potrebné, musí tento typ lietadla neustále oblieť cieľ, čo je energeticky aj časovo neefektívne. Lietadlo ťažšie ako vzduch dosahuje vyššie emisie hluku a taktiež produkuje vyššie emisie oxidu uhličitého, čo sa môže zohľadniť pri letoch v chránených oblastiach alebo v urbánnych oblastiach.

3.1.1. Porovnanie rôznych typov lietadiel pre jednotlivé druhy leteckých prác

Po porovnaní technických a ekonomických parametrov, environmentálneho hľadiska a výhod a nevýhod oboch lietadiel, sa presunieme k pohľadu na ich využitie v oblasti leteckých prác. V tejto časti práce sa pozrieme na to, ako sú lietadlá Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan G1000 vhodné na konkrétne typy leteckých prác, ktoré sme vymedzili v predošlých kapitolách.

Každý typ leteckej práce si vyžaduje iné vlastnosti. V určitých oblastiach je prioritou zotrvanie na dlhší čas vo vzduchu a stabilná manipulácia s vybavením, v iných prípadoch rozhoduje rýchlosť alebo kapacita lietadla. V nasledujúcej tabuľke si uvedieme vhodnejšie lietadlo a dôvod jeho výberu pre jednotlivé letecké práce.

Tabuľka 8: Porovnanie rôznych typov lietadiel pre jednotlivé druhy leteckých prác.

Typ leteckej práce	Vhodnejšie lietadlo	Dôvod výberu
Poľnohospodárstvo	Cessna 208B Grand Caravan G1000	Maximálna cestovná rýchlosť

		Dostatočná kapacita a výkon na efektívne rozprašovanie
Priemysel	Skyship 600	Vysoká stabilita Vytrvalosť letu
Fotografovanie a snímkovanie	Skyship 600	Nízka cestovná rýchlosť Vysoká stabilita letu Vytrvalosť letu
Pozorovacie a hliadkované lety	Skyship 600	Vytrvalosť letu Vysoká stabilita letu Nižšie emisie hluku
Geodetické a kartografické práce	Cessna 208B Grand Caravan G1000	Maximálna cestovná rýchlosť
Pátracie a záchranné operácie	Cessna 208B Grand Caravan G1000	Rýchlejší presun medzi miestami Maximálna cestovná rýchlosť
Reklama a média	Skyship 600	Nízka cestovná rýchlosť Vysoká stabilita letu Vytrvalosť letu Priestor na umiestnenie reklám
Osobná doprava	Cessna 208B Grand Caravan G1000	Efektívnejší presun medzi miestami
Nákladná doprava	Cessna 208B Grand Caravan G1000	Efektívnejší presun medzi miestami

Ako môžeme vidieť v tabuľke, lietadlá Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan sú schopné prevádzky v každej oblasti leteckých prác, avšak ich rozdiely sa ukážu až pri pohľade na konkrétnu činnosť. Skyship 600 sa používa v odvetví leteckých prác, ktoré si vyžadujú zotrvanie na dlhší čas vo vzduchu, väčšiu stabilitu, nízke emisie hluku a taktiež produkuje menšie množstvo oxidu uhličitého. Je teda vhodnejšie pre kategóriu reklama a média, pozorovanie a hliadkovanie, fotografovanie a snímkovanie a pre priemysel.

Na druhej strane Cessna 208B Grand Caravan G1000 je efektívnejšia na miesta, kde je potrebné rýchlo reagovať, prepraviť ľudí alebo náklad z miesta na miesto, alebo pokryť väčšiu oblasť za kratší čas. Z environmentálneho hľadiska je tento typ lietadla dosahuje vyššie emisie hluku a taktiež produkuje viac emisií CO₂.

3.2. Využitie lietadiel vo vybraných leteckých prácach v praxi

V tejto podkapitole si porovnáme lietadlá Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan G1000 v praxi, konkrétne v oblasti fotogrametrie, vápnení lesov a environmentálnom monitorovaní biotopov. Tieto typy práce majú svoje vlastné špecifiká, majú iné nároky na techniku a aj prevádzkové podmienky. Cieľom tejto časti je identifikovať, ktoré lietadlo je vhodnejšou voľbou a v ktorých situáciách.

3.2.1. Fotogrametria

Fotogrametria je metóda na vytvorenie trojrozmerných (3D) modelov pomocou dvojrozmerných (2D) fotiek. Táto metóda zaznamenáva údaje z leteckých snímok, ktoré pomáhajú pri vytváraní detailných modelov obrázkov, čo je obzvlášť užitočné v oblasti geodézie alebo pri rôznych ekologických aplikáciách. [9]

Skyship 600 ponúka v oblasti fotogrametrie stabilitu a vytrvalosť na dlhší čas aj na jednom mieste. Dosahuje nižšie rýchlosti a je schopná prevádzky aj pri nízkych výškach, čo je ideálne pre podrobné mapovanie menších oblastí a tvorenie kvalitných leteckých snímok. Na druhej strane Cessna 208B Grand Caravan G1000 je rýchlejšia, zmapuje väčšiu plochu za kratší čas.

3.2.2. Vápnenie lesov

Vápnenie lesov je spôsob, ako napraviť kyslú pôdu v lesoch, ktorá vzniká pomocou znečistenia ovzdušia oxidom síry a dusíka. Pri vápnení sa do pôdy pridávajú vápenaté látky, ktoré znižujú kyslosť pôdy a zlepšujú životné podmienky pre rastliny a mikroorganizmy. V oblasti letectva sa materiály dostávajú do pôdy pomocou rozptýlu z výšky so špeciálne upravenej konštrukcie lietadiel. [10]

Lietadlo ľahšie ako vzduch je stabilnejšie a pomalšie, čo umožní presné a rovnomerné rozptýlenie špeciálneho materiálu na lesné plochy. Skyship 600 má nižšiu prevádzkovú rýchlosť, teda je vhodnejšia na prácu pri menších plochách. Lietadlo ťažšie ako vzduch dosahuje vyššiu prevádzkovú rýchlosť čo umožní pokrytie lesných pôd špeciálnym materiálom za kratší čas.

3.2.3. Environmentálne monitorovanie biotopov

Environmentálne monitorovanie je pravidelný zber informácií o prírodných prvkoch, ako sú vzduch, voda alebo pôda. Následne tieto informácie pomáhajú vyhodnotiť stav životného prostredia na danom mieste a nasmerovanie ochranné opatrenia na jeho ochranu. V tejto oblasti lietadlá sú vybavené rôznymi senzormi a kamerami, ktoré slúžia na monitorovanie rôznych aspektov, čo umožňuje pokrytie väčšej oblasti za kratší čas, alebo pokrytie ťažko prístupných oblastí. [11]

Lietadlo ľahšie ako vzduch umožní monitorovanie biotopov, vďaka svojej vytrvalosti, na dlhší čas. Tiež je schopné zotrvať na jednom mieste dlhšiu dobu, čo umožní presnejšie výsledky sledovania na danom území. Skyship 600 je tichá, takže umožní monitorovanie bez rušenia okolitého prostredia. Lietadlo ťažšie ako vzduch má výhodu v tejto oblasti hlavne v rýchlosti, čo umožní environmentálne monitorovanie rozsiahlych oblastí za krátky čas.

3.2.4. Výhody a nevýhody lietadiel oblasti fotogrametrie, vápnení lesov a environmentálneho monitorovania biotopov.

V nasledujúcich tabuľkách si uvedieme výhody a nevýhody lietadiel ľahších ako vzduch a ťažších ako vzduch v oblasti fotogrametrie, vápnení lesov a environmentálneho monitorovania biotopov.

Tabuľka 9: Výhody lietadiel Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan G1000 v daných oblastiach

Oblasť	Skyship 600	Cessna 208B Grand Caravan G1000
Fotogrametria	• Stabilný let v nízkej výške • Umiestnenie senzorov	• Rýchle pokrytie oblasti • Snímkovanie z väčšej výšky
Vápnenie lesov	• Presné a rovné rozprášenie • Stabilita	• Rýchle pokrytie oblasti • Vyššia nosnosť
Environmentálne monitorovanie biotopov	• Nízke emisie hluku • Vytrvalosť letu	• Pokrytie väčšej plochy • Rýchle nasadenie

Tabuľka 10: Nevýhody lietadiel Skyship 600 a Cessna 208B Grand Caravan v daných oblastiach

Oblasť	Skyship 600	Cessna 208B Grand Caravan G1000
Fotogrametria	• Pokrytie menšej plochy	• Menej priestoru na zabudovanie senzorov
Vápnenie lesov	• Nižšia nosnosť • Riziko turbulencií • Členité prostredie	• Nepresné rozprášenie
Environmentálne monitorovanie biotopov	• Dlhší čas prípravy na let	• Vyššie emisie hluku

	• Nepriaznivé meteorologické podmienky	• Vyššie emisie CO₂

Ako môžeme vidieť v tabuľkách, porovnanie lietadiel v oblastiach fotogrametrie, vápnenie lesov a environmentálneho monitorovania biotopov zisťujeme, že každé lietadlo má svoje silné aj slabé stránky. Skyship 600 ponúka stabilnejšie, dlhšie a tichšie lety. Pre chránené oblasti, mestá alebo prírodné rezervácie je Skyship 600 ideálna. Cessna 208B Grand Caravan G1000 ponúka väčšiu nosnosť, rýchlejšie nasadenie a väčšiu rýchlosť pre pokrytie veľkých oblastí.

Aj keď každé z týchto lietadiel má svoje výhody a nevýhody, ich spolupráca by bola ideálna pre optimalizáciu viacerých leteckých prác. Skyship 600 by poskytovala stabilnú platformu pre zber dôležitých informácií v rôznych oblastiach na dlhší čas, zatiaľ čo Cessna 208B Grand Caravan G1000 a jej schopnosť efektívneho nasadenia a väčšia rýchlosť by pomohla v oblastiach, kde je potreba pokrytie väčších území za krátky čas. Spoločné využitie týchto dvoch lietadiel a ich spoločne získané informácie, by boli prínosom na poskytnutie presnejších a komplexnejších výsledkov v každej oblasti leteckých prác.

4. Záver

Lietadlá ľahšie ako vzduch prešli určitým vývojom, aj keď sa na niekoľko rokov dostali do pozadia, pretože pre ľudí sa éra lietadiel ľahších ako vzduch skončila nehodou D-LZ-129 Hindenburg. Avšak vďaka rastúcej spoľahlivosti, zvyšovaniu kvality a rýchlosti sú schopné prepraviť cestujúcich z jedného miesta na druhé. Týmto si lietadlá ľahšie ako vzduch našli využitie v leteckej prevádzke a v rôznych odvetviach leteckých prác, a ľudia si ich znova začali všímať.

Lietadlá ľahšie ako vzduch si prešli vývojom vo viacerých oblastiach, sú bezpečnejšie a kvalitnejšie skonštruované ako v minulosti. Tento pokrok si môžeme všimnúť hlavne v rýchlosti, nosnosti a v type materiálov použitých na konštrukciu.

Prostredníctvom praktickej časti sme sa presvedčili, že technologické výzvy a regulačné požiadavky potrebné na bezpečný a efektívny prechod, z pilotovaných lietadiel na bezpilotné lietadlá ľahšie ako vzduch, nie je vôbec jednoduchý. Majú obrovský potenciál v oblastiach letectva, či ide o rôzne letecké práce, alebo ich začlenenie do leteckej prevádzky. Ponúkajú viacero výhod, ale ich začlenenie do leteckej prevádzky nie je jednoduché. Legislatíva nie je dostatočne rozvinutá. Mnoho pravidiel sa týka pilotovaných lietadiel, ktoré sú rozdielne od bezpilotných lietadiel. Nové technológie nie sú ešte zohľadnené, čo spôsobuje právnu neistotu a ich začleňovanie nie je až tak efektívne.

V poslednej kapitole práce sme posúdili ekonomickú efektívnosť a environmentálny vplyv používania lietadiel ľahších ako vzduch, v komerčnej doprave v porovnaní s tradičnými lietadlami. Pozreli sme sa na letecké práce a ich kategorizáciu, ale aj porovnali lietadlo ľahšie ako vzduch Skyship 600 s lietadlom ťažším ako vzduch Cessna 208B Grand Caravan G1000. Zamerali sme sa na ich spoločné vlastností a porovnali ich z rôznych hľadísk.

Nakoniec sme porovnali tieto dva typy lietadiel v oblasti fotogrametrie, vápnení lesov a environmentálneho

monitorovania biotopov. Pri porovnaní týchto lietadiel v tejto oblasti sme zistili, že každé lietadlo má svoje silné aj slabé stránky. Avšak ich spolupráca by bola ideálna pre optimalizovanie leteckých prác. Ich spoločné využitie by bolo prínosné na poskytnutie presnejších a komplexnejších výsledkov v každej oblasti leteckých prác.

Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 54ŽU-4/2025 "Možnosti využitia umelej inteligencie v študijnom programe letecká doprava pri výučbe pilotov a technikov údržby. (SmartSkyEdu)"

Referencie

- [1] P. doc. Ing. Filip Škultéty, Lietadlá 1 Teória a Konštrukcia, 2022.
- [2] J. E. V. Walter James Boyne, „Britannica,“ 14 Apríl 2025. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/airplane/Types-of-aircraft> .
- [3] U. Staff, „Manned Systems and Solutions, LLC,“ [Online]. Available: <https://www.unmannedsas.com/post/understanding-the-difference-between-tethered-and-untethered-drones>.
- [4] G. Year, „Good Year,“ [Online]. Available: https://www.goodyear.eu/sk_sk/consumer/why-goodyear/blimp.html.
- [5] „Code of Federal Regulation,“ 28 Jún 2016. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-107>.
- [6] ICAO, Júl 2018. [Online]. Available: [https://www.icao.int/safety/CAPSCA/PublishingImages/Pages/ICAO-SARPs-\(Annexes-and-PANS\)/Annex%206.pdf](https://www.icao.int/safety/CAPSCA/PublishingImages/Pages/ICAO-SARPs-(Annexes-and-PANS)/Annex%206.pdf) .
- [7] „Vykonávacie nariadenie komisie (EÚ) 2019/947,“ 24 Máj 2019. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=ET>.
- [8] CMS, How to obtain a CLIA Certificate, 2019.
- [9] OCEAN EXPLORATION, „OCEAN EXPLORATION,“ [Online]. Available: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/photogrammetry/photogrammetry.html>.
- [10] L. K. G. O. M. D. P. Z. U. T. Oliver van Straaten, „European Geosciences Union,“ 12 Január 2023. [Online]. Available: <https://soil.copernicus.org/articles/9/39/2023/>.
- [11] NINA, „NINA,“ [Online]. Available: <https://www.nina.no/english/Fields-of-research/Environmental-monitoring>.



POLYMORFNE KONŠTRUKCIE AKO SÚČASŤ RIADENIA LETÚNOV

Michal Schwarz
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Filip Škultéty
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Goal of this work is to find out whether morphing wing configurations are a viable option for flight controls such as elevators, flaps, ailerons etc. This work is divided into 3 sections. First section is about general research of conventional wing constructions, materials used in aircraft and mechanisms used to actuate flight controls. Second section looks into construction of morphing wings, viable materials for these constructions, mechanism used to actuate them and finally designing a functioning morphing wing based on previous research. In final third part we are going to compare morphing configuration against conventional solutions used on aircraft today in CFD simulations as well as in a wind tunnel and compare the results gained by these simulations.

Keywords

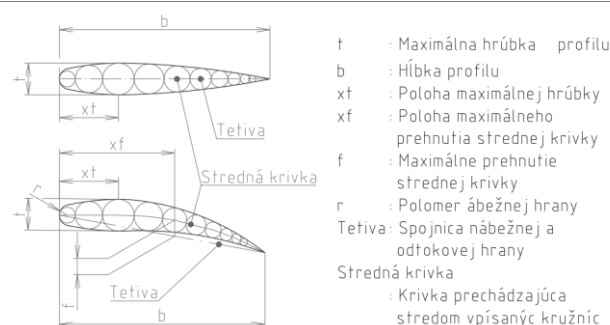
Morphing wing, construction, mechanism, simulation

1. Úvod

Letúny počas letu prechádzajú rôznymi fázami kde sa im menia ich letové výkony. Pri niektorých fázach letu ako vzlet a pristátie však letové výkony nie sú optimalizované keďže letúny sú optimalizované pre najdlhšiu časť letu, teda cestovnú. Pre zlepšenie letových výkonov pri neoptimalizovaných fázach letu sa využívajú sekundárne riadiace plochy, ktoré však v momentálnom štádiu produkujú výrazne zvýšený odpor. Primárne riadiace plochy sú využívané počas celej dĺžky letu či už z dôvodu riadenia alebo aerodynamického vyváženia kde rovnako ako sekundárne produkujú odpor. Polymorfne konštrukcie sa snažia optimalizovať letové výkony pre rôzne fázy letu menením geometrických charakteristík krídla a profilu, aby poskytovali dostatočný aerodynamický vztlak pre let a minimalizovali aerodynamický odpor. Táto práca sa bude zaoberať konštrukciou polymorfných koncepcií, ich porovnaním oproti konvenčným riešeniam riadiacich plôch a ich potencionálnym využitím v prevádzke.

2. Polymorfná konštrukcia

Výraz polymorfný pochádza z gréckych slov *poly* – mnoho alebo viac a *morphia* – tvar. Do slovenčiny tento výraz môžeme preložiť ako mnoho tvarý alebo viactvarý, respektíve označiť niečo, čo je schopné mať viacero foriem. Pôjde teda o leteckú konštrukciu, ktorá je schopná meniť svoj tvar počas letu. Konkrétne pôjde o polymorfne konštrukcie profilov, ktoré budú schopné meniť geometrické charakteristiky vid' (Obrázok 1), ako tetivu, strednú krivku, maximálne prehnutie strednej krivky a ďalšie parametre, ktoré majú vplyv na aerodynamické vlastnosti profilu krídla.



Obrázok 1: Geometrické charakteristiky profilu.

Zdroj: autor podľa 7

Pri profilových polymorfných konštrukciách okrem menenia tvaru strednej krivky môžeme meniť aj hrúbku profilu. Okrem profilových však poznáme aj planárne a neplanárne polymorfne konštrukcie.

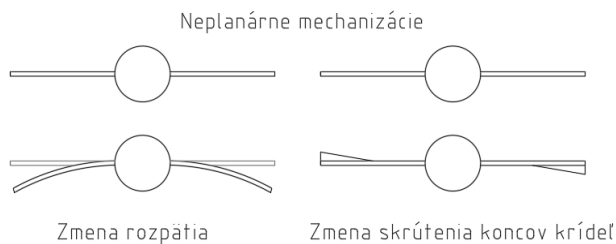
Planárne mechanizácie fungujú na princípe vysúvania a zasúvania častí krídla do inej časti lietadla ako je napríklad krídlo, trup a iné. Pre ich rozdelenie vid' (Obrázok 2).



Obrázok 2: Planárne mechanizácie.

Zdroj: autor podľa 6

Neplanárne mechanizácie vykonávajú pohyb, ktorý nie je limitovaný v jednej rovine, teda je schopný pohybu okolo viacerých osí respektíve v trojrozmernom priestore. Pre ich rozdelenie vid' (Obrázok 14).

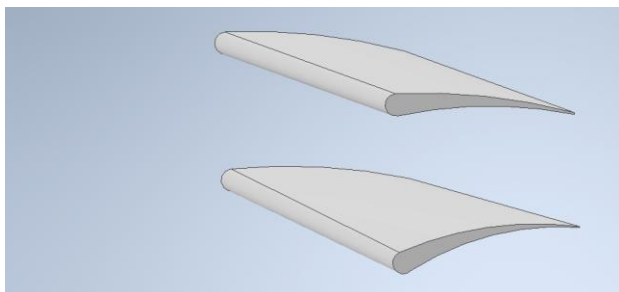


Obrázok 14: Neplanárne mechanizácie.

Zdroj: autor podľa 6

3. História a súčasný stav polymorfných konštrukcií

Princíp tejto technológie bol požitý už na prvom motorovom letúni Wright Flyer v roku 1903. Zabezpečované ňou bolo klonenie letúna cez menenie skrútenia na konci krídel vid' (Obrázok). Čo rezultovalo v diferenciálnom vztlaku na konci krídel a nim indukovaný klonivý moment.

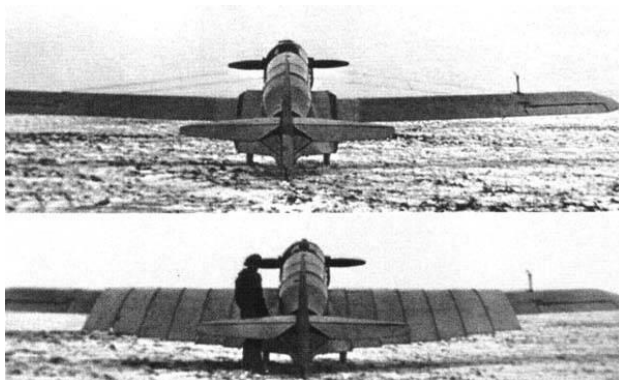


Obrázok 4: Skrútený profil na konci krídla.

Zdroj: autor

Ďalšie využitia tejto technológie v oblasti zmeny profilu sa objavili až v roku 1937 v Sovietskom zväze. Pod vedením Georiva Ivanovicha Bakshaveva boli vyvinuté 2 letúny schopné zmeniť hrúbku a hĺbku profilu krídla. Táto zmena bola riešená vysunutím mechanizovaného potáhu okolo pôvodného krídla. Po vysunutí mechanizácie mali letúny väčšiu plochu krídel čo im dalo lepšie letové výkony na nižších rýchlostiach.

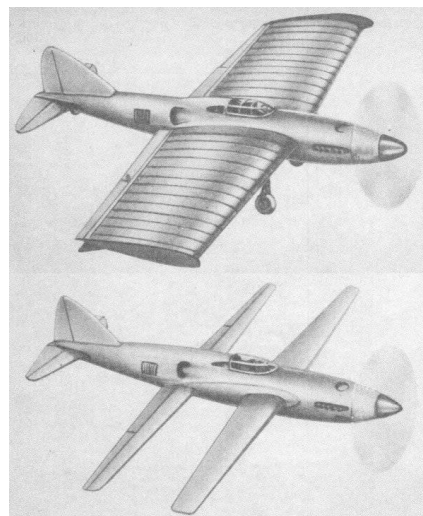
Letún LIG-7 vid' (Obrázok) bol konštruovaný ako jednoplošník zo schopnosťou vysunúť tento potáh do 2/3 rozpätia krídel. [1]



Obrázok 5: LIG-7.

Zdroj: 1

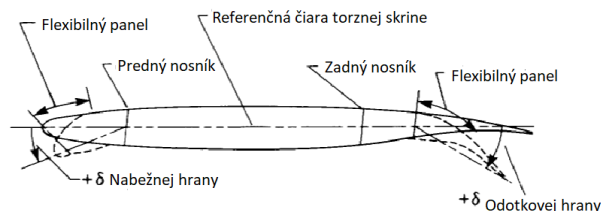
Letún RK-1 vid' (Obrázok) bol skonštruovaný ako s dvomi nosnými plochami v tandeme a bol schopný vysunutia potáhu po celej dĺžke rozpätia. [2]



Obrázok 6: RK-1.

Zdroj: 2

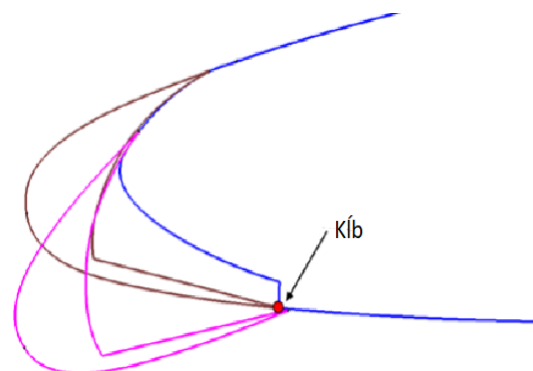
V 80-tych rokoch boli vykonané testy na upravenom letúni F-111 Aardwark dezinovanom ako F-111 AFTI, kde boli vztlakové mechanizácie riešené ako polymorfné konštrukcie vid' (Obrázok). Išlo o tzv. MAW (mission adaptive wing), teda doslovne krídlo, ktoré sa prispôsobí prostrediu podľa danej úlohy [5].



Obrázok 7: Krídlo F-111 AFTI .

Zdroj: 5, Úprava: autor

V súčasnosti sú tieto konštrukcie stále vo vývoji ale nájdu sa aj príklady v prevádzke ako DND (Droop Nose Device) využívané pre vztlakovú mechanizáciu nábežnej hrany letúnov Airbus A380 a A350 vid' (Obrázok) [4].



Obrázok 8: Droop Nose Device.

Zdroj: 4, Úprava: autor

Najväčším priekopníkom tejto technológie je spoločnosť Flexsys, ktorá úspešne otestovala polymorfnú vztlakovú mechanizáciu odtokovej hrany na letúni Gulfstream GIII vid' (Obrázok) počas 22 testových letov. Okrem klapiek táto spoločnosť vytvorila aj polymorfné krídeľká a sloty, ktoré však neboli testované.



Obrázok 9: Polymorfná vztlaková klapka.
Zdroj: 31

Posledná zmienka o ich ďalšom smerovaní bola v roku 2015, kedy oznámili spoluprácu s NASA na vývoji polymorfných modifikácií pre letun KC-135 Stratotanker. Od vtedy však neboli zverejnené žiadne ďalšie verejne dostupné informácie [31].

4. Cieľ a metodika práce

Primárnym cieľom tejto práce je analyzovať možnosti využitia polymorfných konštrukcií ako primárne a sekundárne riadiace plochy letúnov.

Sekundárnymi cieľmi práce je návrh a zostrojenie polymorfnnej riadiacej plochy. Vykonanie CFD simulácie a následná analýza hodnôt z rôznych konfigurácií riadiacich plôch.

Metodika práce

Pred začatím písania sme sa zamerali na literárnu rešerš, z, ktorej sme zozbierali informácie o predošliých odborných článkoch na tému polymorfných konštrukcií. Tieto informácie obsahovali históriu použitia, rôzne možnosti zhotovenia mechanizmu, konštrukčné prvky krídel, vlastnosti materiálov a aplikáciu v praxi.

Po spracovaní informácií získanými z analýzy súčasného stavu boli následne riešené časti bakalárskej práce, kde sme sa zamerali na výber vhodného riešenia pre rôzne aspekty vlastnej konštrukcie, či už ide o materiál, alebo mechanizmus.

Po zvážení všetkých možností ku, ktorým sme dospeli z analýzy sme vybrali polymorfnú konštrukciu typu FishBAC kvôli jej jednoduchosti. Prvá vývojová fáza spočívala vo výbere vhodného profilu kde bol vybraný profil NACA 0012 kvôli jeho hrúbke a návrhu rôznych variantov konštrukcie. Dokopy boli nakreslené 3 varianty v programe AutoCAD z, ktorého boli následne prerobené z 2D výkresov na 3D modely.

Okrem FishBAC sme vytvorili aj konvenčnú a plávajúcu plochu na základe už spomenutého profilu NACA 0012, aby sme mohli porovnať vlastnosti FishBAC.

Následná časť práce riešila CFD simulácie, ktorých bolo dokopy vykonaných 48 pre 4 rôzne uhly nábehu a pre 4 rôzne rýchlosti z, ktorých 3 boli nízke a jedna vyššia vzhľadom na to, že tieto konštrukcie majú momentálne vysoký potenciál pre UAV, ktoré nezvyknú lietať vo vysokých rýchlostiach.

Tieto simulácie boli vykonané v programe Ansys Fluent podľa následného postupu:

- V Ansys workbench sme otvorili Fluid Flow (Fluent with Fluent Meshing).
- Pripravili sme si model pre meshing cez DesignModeler.
- Mesh bol urobený z minimálnou veľkosťou buniek 0,0001 m.
- Následne sme si pre simuláciu nastavili parametre ako rýchlosť, plochu a hĺbku krídla a simulovali na 250 iterácií.
- Po dosimulovaní sme si dali vytlačiť hodnoty a zobrali snímku obrazovky grafického zobrazenia rýchlostných a tlakových distribúcií.

Detailný textový postup použitý pre simulácie si môžete pozrieť v prílohe C

Posledná časť práce rieši stavbu živého modelu. Pri stavbe modelu sme začali vytlačením nábežnej časti do ktorej bol vsadený motor aby sme sa uistili, že bol model správne navrhnutý. Po tomto teste sme vytlačili tenkú sekciu chrbtice z PETG a kladku zo živice na ktorej sme vykonali testy ktoré prebehli úspešne. Pri tomto testovaní sme sa rozhodli použiť zásuvný potah namiesto pružného po pokuse z pilovým listom ako potahom. Následne sme navrhli variant 3 ktorý bol navrhnutý pre zásuvný potah. Vytlačili sme hrubšiu časť chrbtice na ktorej sme otestovali potah z mäčkeneho PVC aby sme videli približné chovanie potahu a usúdili sme, že potrebujeme pridať koľajníc, aby potah opisoval geometriu pozdĺžnikov.

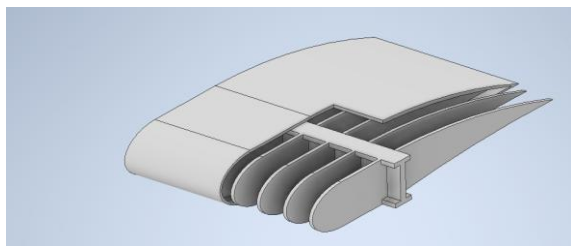
5. Konštrukcia polymorfného profilu

V tejto časti sme sa zamerali na konštrukčné riešenia krídel ktoré využívajú profilové polymorfné konštrukcie. Riešili sme konštrukčnú, materiálovú a mechanizmovú problematiku.

5.1. Konštrukcia

Konštrukčná časť sa zaoberala nosnou sústavou krídla. Jej hlavným zameraním bolo vybrať vhodnú tradičnú konštrukciu krídla ktorá by bola ideálna pre tieto konštrukcie a podľa toho urobiť pár návrhov ako by mohla vyzerať.

Z pomedzi nosníkovej, pološkrupinovej, nosníkovo pološkrupinovej a škrupinovej konštrukcie sme vybrali nosníkovú konštrukciu vid' (Obrázok) ako najlepšiu možnosť z dôvodu nižšieho počtu nosných prvkov a jednoduchej implementácii aktuátorov a mechanizmov [7].



Obrázok 10: Nosníková konštrukcia.
Zdroj: autor podľa 7

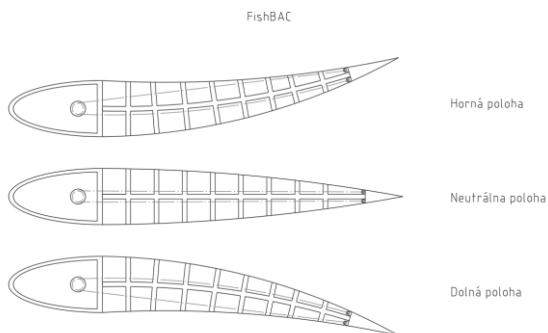
5.2. Materiály

V materiálovej časti sme sa zaoberali možným využitím rôznych materiálov pre tieto konštrukcie z oblasti kovov, plastov a kompozitov. Konštrukciu sme rozdelili na tri časti pre ktoré sme riešili parametre, ako pevnosť, pružnosť, hmotnosť a odolnosť voči únave materiálu.

5.3. Mechanizácia

Táto časť sa zaoberala rôznymi konceptami mechanizácií polymorfných konštrukcií a výberom jedného konceptu na ktorom bude vykonaná štúdia. Pri výbere konceptu sme zohľadňovali nasledujúce parametre: Smer vychýlenia, veľkosť vychýlenia, výsledný tvar po vychýlení a komplexnosť mechanizmu.

Nakoniec sme z pomedzi kandidátov vybrali koncept FishBAC, teda (Fish bone adaptive camber) viď (Obrázok). Ide o mechanizáciu ktorá mimikuje biológiu rýb pre dosiahnutie zmeny tvaru strednej krivky. Dôvodom tohto výberu bola jednoduchá konštrukcia a možnosť vychýlenia do oboch strán a hladký prechod v oblasti vychýlenia [26].



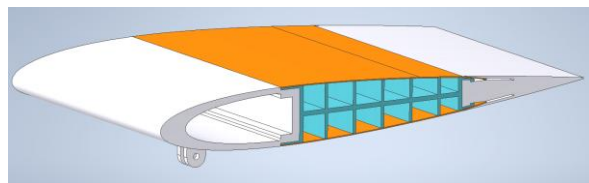
Obrázok 11: FishBAC.
Zdroj: autor podľa 26

Ako posledné sme v teoretickej návrhovej časti riešili otázku riadenia a ovládania. Riešili sa možnosti priameho a nepriameho riadenia a ovládanie pre polymorfné konštrukcie kde sa definovali aké pohyby musí riadiaca sústava byť schopná vykonať aby dokázala riadiť polymorfné konštrukcie a aké komponenty by mohli byť využité pre ich docielenie.

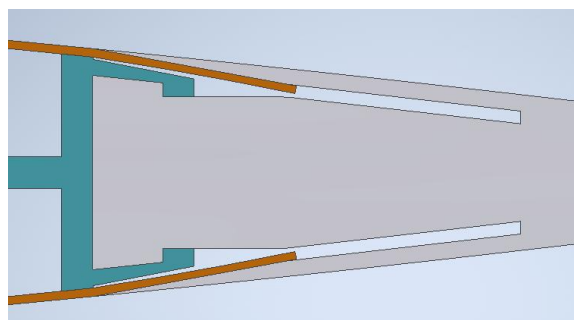
6. Návrh a výroba modelu

Ako už bolo spomenuté v 5.3 pre reálny model sme si vybrali koncepciu polymorfnej konštrukcie FishBAC. Boli navrhnuté tri podobné varianty modelu ktoré sa líšili jedným alebo viacerých

rozdieloch. Prvé dva varianty mali využívať pružný potah zatiaľ čo variant 3 viď (Obrázok 15) využíval zasúvací potah viď (Obrázok) kvôli čomu bol nakoniec aj vybraný.



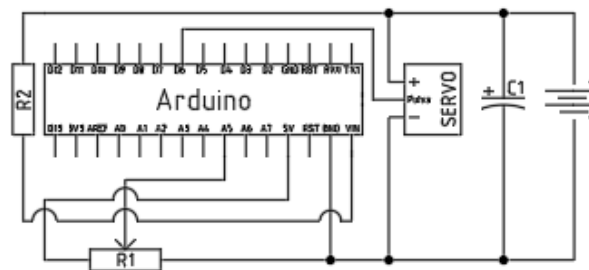
Obrázok 15: FishBAC V3.
Zdroj: autor



Obrázok 12: FishBAC V3 Zásuvné drážky pre potah.
Zdroj: autor

Následne bola riešená mechanizácia kde sa vyberali medzi rôznymi komponentami, ako kladka, reťazové koleso a remenica a ku nim príslušným ťažným médiami ako lanko, reťaz a remeň. V momentálnom stave je v modeli využívaná ozubená kladka a lanko ktoré je ukotvené o odtokovú časť modelu za pomoci sťahovacích pásovk, tie boli vybrané z dôvodu jednoduchosti montáže a možnosti napínania lanka ich sťahovaním.

Posledná návrhová časť riešila riadenie a ovládanie. Vzhľadom na to že priame riadenie by bolo náročné realizovať pri testoch vo veternom tuneli a celkovo by bolo zložitejšie sme sa rozhodli použiť nepriame riadenie formou FBW (Fly By Wire). Mechanizácia bude riadená pomocou elektromotora ktorý bude dostávať signál z potenciometra spracovaný cez arduino nano. Pre schému elektrického zapojenia viď (Obrázok).



Obrázok 13: Schéma zapojenia.
Zdroj: autor

Model je momentálne stále vo vývoji, ale čiastočne funkčný. Je schopný vykonávania vychýlení do oboch smerov viď (Obrázok) a (Obrázok).



Obrázok 14: Model FishBAC horné vychýlenie.
Zdroj: autor

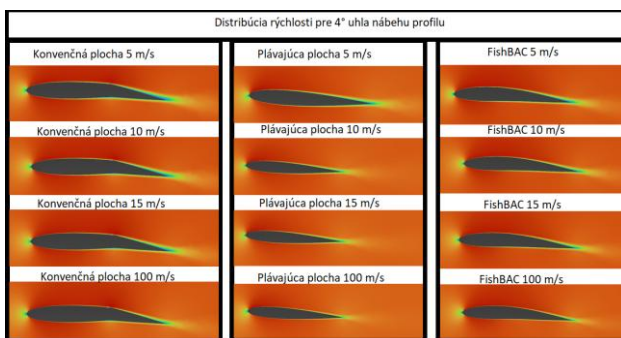


Obrázok 15: Model FishBAC dolné vychýlenie.
Zdroj: autor

7. Interpretácia výsledkov

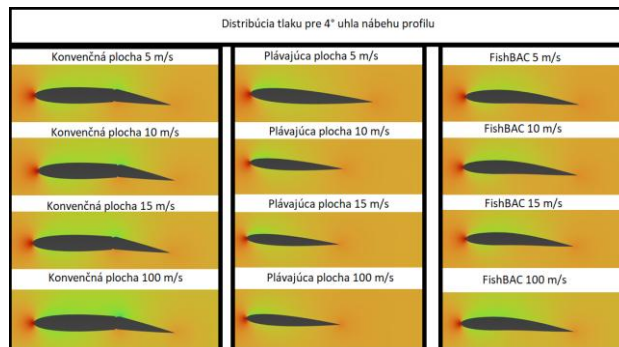
Táto časť práce sa zameriava na výsledky CFD simulácií vykonaných v Ansys Fluent. Ako vzorku hodnôt bolo vykonaných 48 simulácií pre štyri rôzne uhly nábehu profilu na štyroch rôznych rýchlostiach.

7.1. Distribúcia rýchlostí a tlaku



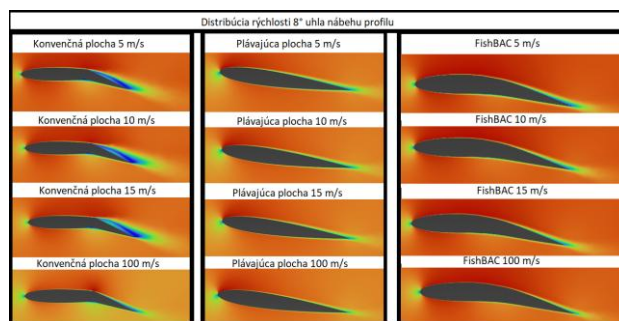
Obrázok 16: Distribúcia rýchlostí pre 4° uhla nábehu profilu.

Zdroj: autor

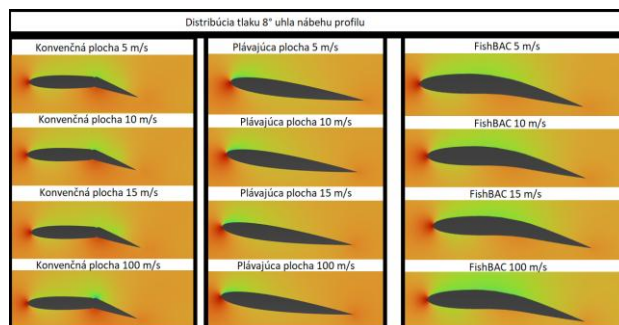


Obrázok 17: Distribúcia tlaku pre 4° uhla nábehu profilu.
Zdroj: autor

Vid' (Obrázok) a (Obrázok) pre zmeny rýchlostných a tlakových distribúcií pre pre uhol nábehu profilu 4°. Konvenčná konfigurácia má výrazné polia zvýšeného a zníženého tlaku a zvýšenej a zníženej rýchlosti v oblasti kľbu kormidla. Plávajúca konfigurácia tieto výrazné polia nemá, polia nižšieho tlaku sú však najmä na nábežnej časti čo nie je ideálne pre generáciu vztaku. Konfigurácia FishBAC pri tomto uhle nábehu profilu nadobúda podobu semi-symetrického profilu. Distribúcia nízkého tlaku nad profilom je sa ťahne po väčšej ploche ako pri plávajúcej tak isto pozorovať miesta z výraznejšou zmenou tlakových a rýchlostných polí, ale táto zmena nie je výrazná ako pri konvenčnej konfigurácii.



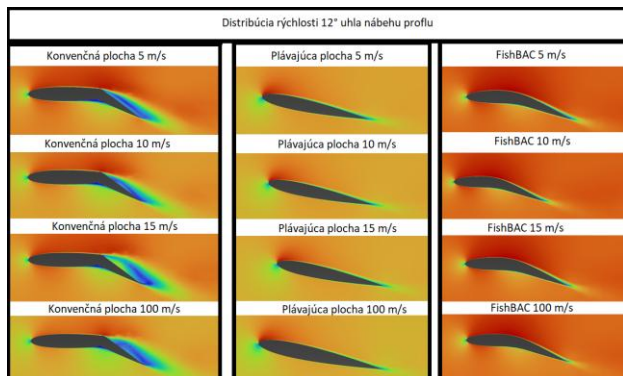
Obrázok 18: Distribúcia rýchlostí pre 8° uhla nábehu profilu.
Zdroj: autor



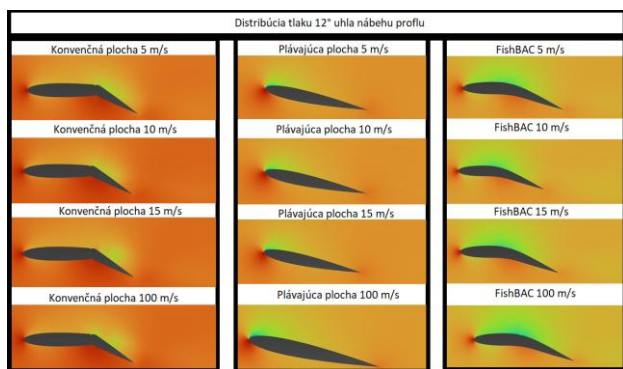
Obrázok 19: Distribúcia tlaku pre 8° uhla nábehu profilu.
Zdroj: autor

Vid' (Obrázok) a (Obrázok) pre zmeny rýchlostných a tlakových distribúcií pre pre uhol nábehu profilu 8°. Konvenčná konfigurácia má podobu distribúciu tlakových polí, ale na rýchlostnej distribúcii môžeme vidieť odtrhávajúce medznej vrstvy na kormidle. Pri tomto uhle nábehu je zvýšenie rýchlosti schopné zabrániť tomuto odtrhnutiu. Pri plávajúcej konfigurácii

nemôžeme pozorovať výrazné zmeny okrem z intenzívnenia tlakových a rýchlostných polí nad profilom v nábežnej časti. Pri Konfigurácii FishBAC sa zo zvýšením uhla nábehu rovnako zintenzívňujú tlakové a rýchlostné polia ako pri plávajúcej konfigurácii. Nemôžeme pozorovať žiadne odtrhávajúce medznej vrstvy ako pri konvenčnej konfigurácii.



Obrázok 20: Distribúcia rýchlostí pre 12° uhla nábehu profilu.
Zdroj: autor



Obrázok 21: Distribúcia tlaku pre 12° uhla nábehu profilu.
Zdroj: autor

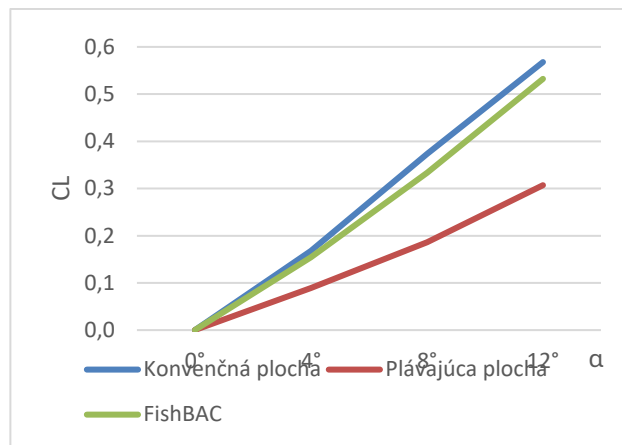
Viď (Obrázok) a (Obrázok) pre zmeny rýchlostných a tlakových distribúcií pre uhol nábehu profilu 12°. Konvenčná plocha si ponecháva tlakové a rýchlostné distribúcie ako pri nižších uhloch nábehu profilu. Rovnako dochádza k odtrhávaniu medznej vrstvy, ale v tomto prípade zvýšenie rýchlosti tomuto javu nepredídeme. Plávajúca konfigurácia si rovnako ponecháva tlakové a rýchlostné distribúcie ktoré boli pozorované pri nižších uhloch nábehu. Pri konfigurácii FishBAC môžeme pozorovať výrazné zvýšenie intenzívnosti rýchlostných a tlakových polí, tieto polia sú však kvôli hladkému prechodu distribuované po väčšej ploche oproti konvenčnej konfigurácii.

7.2. Grafy

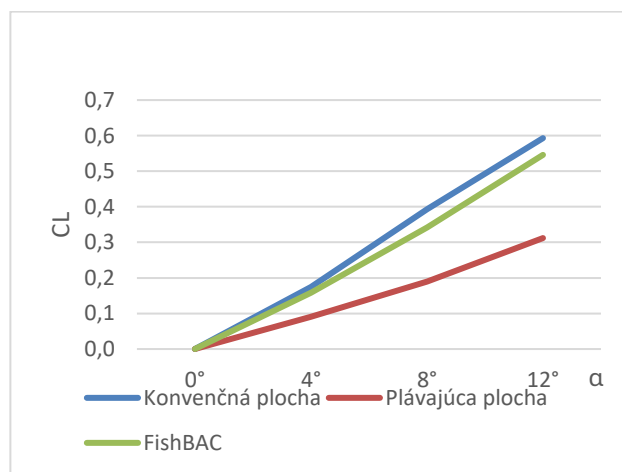
Vztlakové a odporové vlastnosti, ktoré boli získané simuláciou na týchto plochách môžu byť zobrazené za pomoci grafov ako vztlaková, odporová čiara a krivky aerodynamickkej jemnosti. Pre interpretáciu výsledkov využijeme hodnoty získané zo simulácií pre rýchlosti 15 m/s a 100 m/s. Dôvody výberu týchto rýchlostí sú nasledovné. 15 m/s je rýchlosť, ktorú pri menších UAV môžeme považovať za vzletovú rýchlosť. Rýchlosť 100 m/s môžeme považovať za cestovnú rýchlosť UAV, alebo pristávaciu a vzletovú väčších letúnov. Ako východzie hodnoty porovnania

budeme používať hodnoty konvenčnej plochy, ktorá bude mať hodnotu 100%, teda pokiaľ konvenčná plocha bude mať hodnotu 1 a plocha X hodnotu 0.5, plocha X bude generovať 50% danej hodnoty.

7.2.1. Vztlakové charakteristiky



Graf 1: Koefficient vztlaku CL pre v = 15 m/s.
Zdroj: autor



Graf 2: Koefficient vztlaku CL pre v = 100 m/s.
Zdroj: autor

Tabuľka 1: Koefficient vztlaku CL pre v = 15 m/s.

Koefficient vztlaku CL pre v = 15 m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	0.1677366	0.088940296	0.15430984
%	100%	53,02 %	92,00 %
8°	0.37301864	0.18623416	0.33294064
%	100%	49,93 %	89,26 %
12°	0.56784089	0.3070217	0.53228697
%	100%	54,07 %	93,74 %

Zdroj: autor

Tabuľka 2: Koeficient vztlaku CL pre $v = 100$ m/s.

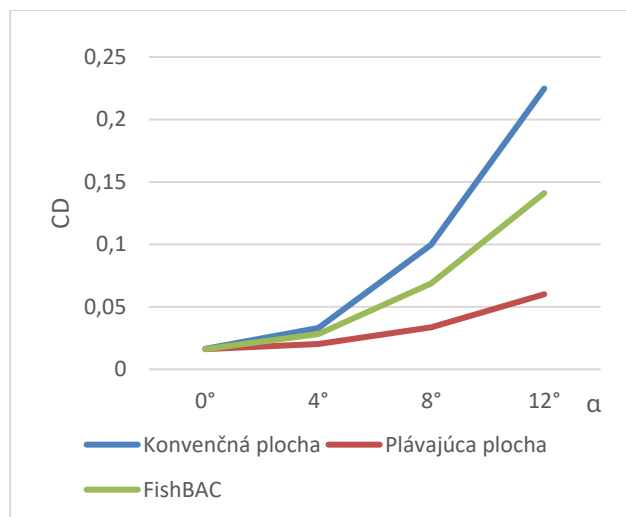
Koeficient vztlaku CL pre $v = 100$ m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	0.17413646	0.090419647	0.15824075
%	100%	51,93 %	90,87 %
8°	0.39342449	0.18958228	0.34183689
%	100%	48,19 %	87%
12°	0.59300531	0.31199387	0.54596965
%	100%	52,61 %	92,07 %

Zdroj: autor

Vid' (Graf), (Graf), (Tabuľka) a (Tabuľka) kde môžeme dedukovať nasledovné: Konvenčná plocha má z troch skúmaných variantov najvyšší koeficient vztlaku. Plávajúca plocha dosahuje v priemere 51,63 % čo je približne polovičná hodnota konvenčnej plochy zatiaľ čo priemerná hodnota konfigurácie FishBAC je 90,82 %.

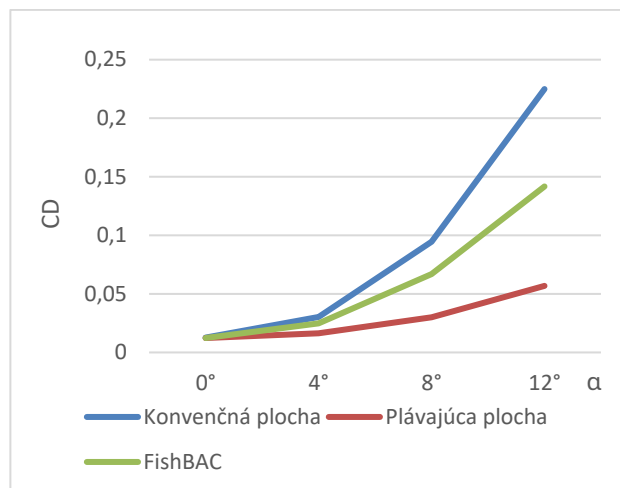
Z týchto údajov môžeme vyvodiť nasledovný záver: Pri vykonávaní manévra by dosiahol najväčšiu účinnosť riadiacich plôch letún, ktorý používa konvenčnú konfiguráciu riadiacich plôch. V prípade, že by letún využíval plávajúcu konfiguráciu riadiacich plôch aerodynamický moment na ťažisko letúna by bol len polovičný voči konvenčnej ploche, čo by malo za výsledok pomalší manéver alebo nutnosť vyššieho vychýlenia riadiacej plochy pre jeho vykonanie. Konfigurácia FishBAC je schopná generovať len o 10% menší aerodynamický moment voči konvenčnej konfigurácii, čo by rovnako spôsobilo nižšiu účinnosť riadiacich plôch, ale tento rozdiel by nebol výrazný ako pri plávajúcej konfigurácii.

7.2.2. Odporové charakteristiky



Graf 3: Koeficient odporu CD pre $v = 15$ m/s.

Zdroj: autor



Graf 4: Koeficient odporu CD pre $v = 100$ m/s.

Zdroj: autor

Tabuľka 6: Koeficient odporu CD pre $v = 15$ m/s.

Koeficient odporu CD pre $v = 15$ m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	0.033149336	0.020219168	0.028266173
%	100%	61,00 %	85,27 %
8°	0.099831494	0.03365793	0.068749713
%	100%	33,72 %	68,87 %
12°	0.224723	0.060066987	0.1410193
%	100%	26,73 %	62,76 %

Zdroj: autor

Tabuľka 4: Koeficient odporu CD pre $v = 100$ m/s.

Koeficient odporu CD pre $v = 100$ m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	0.030201307	0.016413237	0.024875292
%	100%	54,35 %	82,37 %
8°	0.094536345	0.029993662	0.066853563
%	100%	31,73 %	70,72 %
12°	0.22489681	0.056827116	0.14173511
%	100%	25,27%	63,02 %

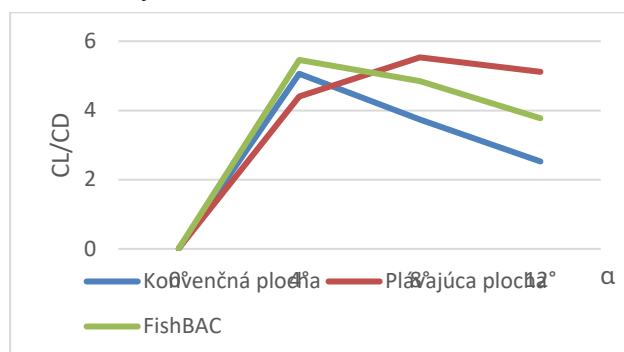
Zdroj: autor

Vid' (Graf), (Graf), (Tabuľka 6) a (Tabuľka) kde môžeme dedukovať nasledovné: Konvenčná plocha z troch skúmaných variantov vytvára najvyšší koeficient odporu. Rovnako ako v prípade vztlaku koeficient plávajúcej plochy je najnižší, ale na rozdiel od vztlaku so zvyšujúcim sa uhlom nábehu profilu rovnako, ako aj pri konfigurácii FishBAC výrazne klesá oproti hodnotám konvenčnej konfigurácie.

Z týchto údajov môžeme vyvodiť nasledovný záver: Letúny s plávajúcou konfiguráciou riadiacich plôch by produkovali výrazne menší odpor od letúnov s konvenčnou alebo FishBAC konfiguráciou riadiacich plôch. Konfigurácia FishBAC produkuje

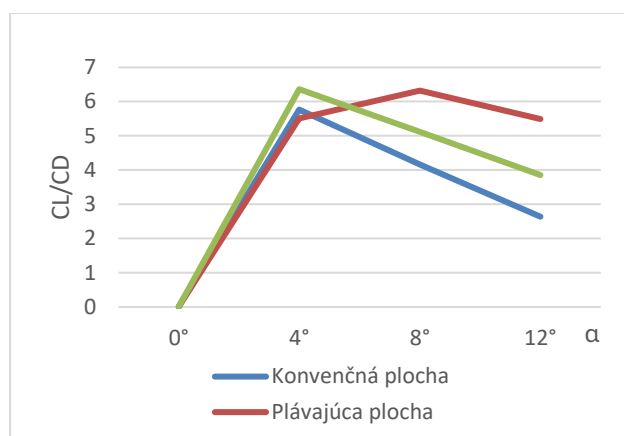
značne vyšší odpor ako plávajúca konfigurácia, ale predstavuje zlepšenie oproti konvenčnej konfigurácii.

7.2.3. Aerodynamická čistota



Graf 5: Aerodynamická jemnosť pri 15 m/s.

Zdroj: autor



Graf 6: Aerodynamická jemnosť pri 100 m/s.

Zdroj: autor

Tabuľka 5: Aerodynamická jemnosť pri v = 15 m/s.

Aerodynamická jemnosť pri v = 15 m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	5.060028955	4.398810871	5.459169871
%	100%	86,93 %	107,88 %
8°	3.736482597	5.533143601	4.842793162
%	100%	148,08 %	129,61 %
12°	2.52684812	4.842793162	3.774568233
%	100%	191,17 %	149,38 %

Zdroj: autor

Tabuľka 6: Aerodynamická jemnosť pri v = 100 m/s.

Aerodynamická jemnosť pri v = 100 m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	5.765858411	5.508946651	6.361362512
%	100%	95,54 %	110,33 %
8°	4.161621544	6.320744696	5.113218723

%	100%	151,88 %	122,87 %
12°	2.636788445	5.49022882	3.852042377
%	100%	208,22 %	146,09 %

Zdroj: autor

Vid' (Graf), (Graf), (Tabuľka) a (Tabuľka) kde môžeme dedukovať nasledovné: Pri nižších uhloch nábehu profilu má plávajúca konfigurácia najnižšiu aerodynamickú čistotu zatiaľ čo FishBAC ju má najvyššiu. Zo zvažujúcim sa uhlom nábehu profilu sa však hodnoty plávajúcej konfigurácie zvyšujú, dosiahnu viac ako dvojnásobok konvenčnej konfigurácie. Podobný vývoj môžeme pozorovať aj pri FishBAC, táto konfigurácia však dosiahne iba 146,09 % hodnoty konvenčnej konfigurácie.

Z týchto údajov môžeme vyvodit' nasledovný záver: Konvenčná a FishBAC konfigurácie majú vysokú aerodynamickú čistotu pri nižšom uhle nábehu profilu. Toto by sa v praxi preukázalo na efektívnosti riadiacej plochy pri týchto uhloch nábehu, ktoré by boli využívané pre aerodynamické vyváženie počas cestovnej fázy letu. Pre vyššie uhly nábehu hodnoty plávajúcej konfigurácie aerodynamická čistota narastie oproti ostatným konfiguráciám. Tento nárast spôsobí zvýšenie efektivity plávajúcej konfigurácie.

7.2.4. Komparácia konfigurácií

Riadiace plochy sú prostriedky na ovládanie letúna v priestore, tieto plochy musia byť schopné vytvárať dostatočne silné aerodynamické momenty na ťažisko letúna, aby bol letún považovaný za riaditeľný

Konvenčná konfigurácia generuje najvyššiu vztlakovú silu, čo ju robí najviac účinnú. Letún, ktorý využíva konvenčnú konfiguráciu by oproti letúnom, ktoré využívajú inú konfiguráciu bude mať najvyššiu obratnosť. Zároveň však generuje najvyššiu odporovú silu čo má za následok vyššiu spotrebu paliva. Pomer generovaného vztlaku a odporu je celkovo najhorší zo všetkých porovnávaných konfigurácií, čo ho robí najmenej efektívny.

Vztlakové sily plávajúcej konfigurácie sú najnižšie z porovnávaných konfigurácií, teda jej účinnosť z pomedzi nich je najnižšia, čo vyústi v horšiu obratnosť. Odporové sily sú však rovnako najnižšie, čo ich robí ideálnou konfiguráciou pre zníženie spotreby paliva. Pomer vztlakových a odporových síl je nižší pri menšom uhle nábehu, ale pri narastajúcom uhle nábehu tento pomer rastie vzhľadom na ostatné konfigurácie.

Konfigurácia FishBAC produkuje o 10% menšiu vztlakovú silu a výrazne menší odpor oproti konvenčnej konfigurácii. Toto ju robí výrazne efektívnejšiu s porovnateľnou účinnosťou oproti konvenčnej konfigurácii. Plávajúca plocha má najvyššiu efektívnosť ale zároveň najnižšiu účinnosť.

8. Záver

Cieľom tejto práce bolo analyzovať či sú polymorfné konštrukcie vhodnou náhradou za rôzne konfigurácie riadiacich plôch používaných v dnešných letúnoch. Existuje mnoho konceptov polymorfných konštrukcií a ich mechanizácií, ktoré sa líšia v komplexnosti, smere vychýlenia, stupňa vychýlenia a každá koncepcia má pozitíva aj negatíva. CFD simulácie vykonané v Ansys Fluent na koncepte FishBAC nám preukázali, že

polymorfne konštrukcie nám poskytujú zlepšenia, ale aj zhoršenia rôznych aerodynamických charakteristík. V tejto práci neboli CFD simulácie vykonané v plnom rozsahu pre ostatné koncepty, avšak výskumy v analýze súčasného stavu preukázali výsledky podobné tým, ktoré boli dosiahnuté v našej práci. Okrem aerodynamických charakteristík je však potrebné spomenúť aj nevýhody v oblasti konštrukčnej, bezpečnostnej, údržbovej a ekonomickej. Polymorfne konštrukcie sú výrazne komplexnejšie z hľadiska konštrukcie oproti konvenčným riešeniam, to znamená, že sú náročnejšie na výrobu, väčšia šanca na zlyhanie komponentu, náročnejšia údržba, a to všetko vyústi do vyšších ekonomických nákladov. Polymorfne konštrukcie predstavujú zlepšenie z hľadiska letových vlastností a úspory paliva, kvôli zníženého odporu je otáznosť, či sú tieto zlepšenia dostatočné na to, aby pokryli náklady spôsobené jej komplexnejšou konštrukciou. Výskum polymorfných konštrukcií súkromnými spoločnosťami ale aj vládami financované projekty však naďalej napreduje, či už v oblasti optimalizácie už existujúcich alebo vývojom nových konceptov polymorfných konštrukcií. Niektoré koncepty sú už zavedené v prevádzke alebo boli testované na letúnoch a ukázali sľubné výsledky. V momentálnom stave však väčšina polymorfných konštrukcií nie je v štádiu, v ktorom by mohli byť zavedené do prevádzky.

Pokračovanie tejto práce by mohlo byť realizované optimalizáciou konfigurácie FishBAC, ako napr. odstránenie alebo minimalizovanie flutteru, optimalizovanie riadiacich prvkov alebo re-dizajn niektorých častí. Po odstránení nedostatkov by sa mohlo navrhnúť a skonštruovať UAV, ktoré využíva konfiguráciu FishBAC pre jednu alebo viac riadiacich plôch a porovnať letové výkony FishBAC a konvenčných konfigurácií.

Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

- [1] G. Witcher, "Experimental aircraft RK / LIG-7," Военное обозрение. Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: <https://en.topwar.ru/105007-eksperimentalnyy-samolet-rk-lig-7.html>
- [2] ulyakinmariupol, "Experimental fighter RK-I," Военное обозрение. Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: <https://en.topwar.ru/20680-eksperimentalnyy-istrebitel-rk-i.html>
- [3] VÁVRA, Pavel. a kol.: Strojnícke tabuľky pre SPŠ strojnícke, Bratislava, Alfa 1984. ISBN
- [4] H. Strüber, "THE AERODYNAMIC DESIGN OF THE A350 XWB-900 HIGH LIFT SYSTEM". In: 29th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences. St Petersburg, Russia. Dostupné na: https://www.icas.org/icas_archive/ICAS2014/data/papers/2014_0298_paper.pdf

- [5] S. Powers, L. Webb, E. Friend, and W. Lokos, "Flight test results from a supercritical mission adaptive wing with smooth variable camber," in *6th AIAA Biennial Flight Test Conference*, Hilton Head, SC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aug. 1992. doi: 10.2514/6.1992-4101.
- [6] T. Majid and B. W. Jo, "Status and Challenges on Design and Implementation of Camber Morphing Mechanisms," *Int. J. Aerosp. Eng.*, vol. 2021, no. 1, p. 6399937, 2021, doi: 10.1155/2021/6399937.
- [7] ŠKULTĚTY, Filip: Lietadlá 1, Žilina, EDIS 2022. ISBN 978-80-554-1925-1
- [8] VAŠKO, Milan TECHNICKÁ MECHANIKA A PRUŽNOST'
- [9] B. N. Bhat *et al.*, "Chapter 2: Aerospace Materials Characteristics," 2018. doi: 10.2514/4.104893.
- [10] "Carbon Fiber - The Material Of The Future? - YouTube." Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=aKpDyJnxQQ>
- [11] J. Martinez, D. Scopelliti, C. Bil, R. Carrese, and P. Marzocca, "Design, Analysis and Experimental Testing of a Morphing Wing," Jan. 2017. doi: 10.2514/6.2017-0059.
- [12] DIMINO, Ignazio. et al. Actuation System Design for a Morphing Wing Trailing Edge Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://www.cira.it/en/Pubblicazioni/2014_04_25_SARISTU.pdf
- [13] S. Meguid, Y. Su, and Y. Wang, "Complete morphing wing design using flexible-rib system," *Int. J. Mech. Mater. Des.*, vol. 13, Mar. 2017, doi: 10.1007/s10999-015-9323-0.
- [14] P. L. Bishay *et al.*, "Design and Analysis of MataMorph-3: A Fully Morphing UAV with Camber-Morphing Wings and Tail Stabilizers," *Aerospace*, vol. 9, no. 7, p. 382, Jul. 2022, doi: 10.3390/aerospace9070382.
- [15] H. Zhu, "History and Future Development of Morphing-Wing Aircrafts," *Theor. Nat. Sci.*, vol. 86, pp. 120–125, Jan. 2025, doi: 10.54254/2753-8818/2025.20190.
- [16] M. S. Parancheerivilakkathil, R. M. Ajaj, and K. A. Khan, "A compliant polymorphing wing for small UAVs," *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 33, no. 10, pp. 2575–2588, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.cja.2020.03.027.
- [17] T. Marketing, "Why Springs are not Made of Aluminium?," Technische veren specialist | Tevema.com. Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: <https://www.tevema.com/why-springs-are-not-made-of-aluminium/>
- [18] A. Vila Masip, "Design and analysis of a Morphing Wing concept for a UAV - Albert Vila Masip," Oct. 2020. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/363335309_Design_and_analysis_of_a_Morphing_Wing_concept_for_a_UAV_-_Albert_Vila_Masip#fullTextFileContent
- [19] N. Nguyen and I. Tuzcu, "Aeroelastic Flight Dynamics of Flexible Aircraft with Inertial and Propulsive Force Interactions," Aug. 2009. doi: 10.2514/6.2009-6045.

- [20] A. Thomas, N. Nair, A. Jose, and N. CS, "Design and Analysis of Flexible Wing," *ACS J. Sci. Eng.*, vol. 3, pp. 42–52, Mar. 2023, doi: 10.34293/acjsse.v3i1.60.
- [21] S. Bhat and R. Patibandla, "Metal Fatigue and Basic Theoretical Models: A Review," in *Alloy Steel - Properties and Use*, 2011. doi: 10.5772/28911.
- [22] N. Yuri, "MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS FIBER AND CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITES," *Int. J. Adv. Res.*, vol. 12, pp. 518–525, Oct. 2024, doi: 10.21474/IJAR01/19668.
- [23] "Types of Plastic | Learn What is Plastic Made Of & Different Types of Plastic - A&C Plastics." Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: <https://www.acplasticsinc.com:443/informationcenter/r/7-different-types-of-plastic-and-how-they-are-used>
- [24] A. P, "A Closer Look at 3D Printing Materials: Plastics," 3Dnatives. Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174/>
- [25] "Thermoplastic Polyurethane (TPU) Material: Properties & Structure." Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/thermoplastic-polyurethanes-tpu>
- [26] C. Beaverstock, B. Woods, J. Fincham, and M. Friswell, "Performance Comparison between Optimised Camber and Span for a Morphing Wing," *Aerospace*, vol. 2, pp. 524–554, Sep. 2015, doi: 10.3390/aerospace2030524.
- [27] A. E. Rivero, S. Fournier, R. M. Heeb, and B. K. S. Woods, "Design, Manufacture and Wind Tunnel Test of a Modular FishBAC Wing with Novel 3D Printed Skins," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12020652.
- [28] H. L. Şahin and Y. Yaman, "Synthesis, Analysis, and Design of a Novel Mechanism for the Trailing Edge of a Morphing Wing," *Aerospace*, vol. 5, p. 127, Dec. 2018, doi: 10.3390/aerospace5040127.
- [29] M. S. Parancheerivilakkathil, Z. Haider, R. M. Ajaj, and M. Amoozgar, "A Polymorphing Wing Capable of Span Extension and Variable Pitch," *Aerospace*, vol. 9, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2022, doi: 10.3390/aerospace9040205.
- [30] Q. Chanzy and A. J. Keane, "Analysis and experimental validation of morphing UAV wings," *Aeronaut. J.*, vol. 122, no. 1249, pp. 390–408, Mar. 2018, doi: 10.1017/aer.2017.130.
- [31] "FlexSys," FlexSys. Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: <https://www.flxsys.com>
- [32] KC-135 Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: <https://www.airforce-technology.com/wp-content/uploads/sites/6/2020/06/200306-Z-QI712-0001-1.jpg>
- [33] B. Woods and M. Friswell, "Preliminary Investigation of a Fishbone Active Camber Concept," in *ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2012*, Sep. 2012. doi: 10.1115/SMASIS2012-8058.
- [34] E. Özbek, S. Ekici, and T. Karakoc, "Unleashing the Potential of Morphing Wings: A Novel Cost Effective Morphing Method for UAV Surfaces, Rear Spar Articulated Wing Camber," *Drones*, vol. 7, p. 379, Jun. 2023, doi: 10.3390/drones7060379.
- [35] P. L. Bishay *et al.*, "SCAMORSA-1: A camber-morphing wind turbine blade with sliding composite skin," *J. Eng. Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 931–940, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jer.2024.04.006.
- [36] PECHO, Pavol. Plasty a ich rozdelenie
- [37] "Polyamide (Nylon): Guide to PA6, PA66, PA11, PA12 Variants." Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon>
- [38] "Polyethylene Terephthalate (PET) - Uses, Properties & Structure." Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic>



ANALÝZA VPLYVU SPÄTNÉHO TLAKU VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU NA SPOTREBU PALIVA V DVOJDOBÝCH MOTOROCH

Filip Stojčev
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Peter Lubják
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Two-stroke engines have been known for a long time. Despite strong competition from four-stroke and electric engines, they continue to remain relevant. Their major advantage lies in their simple construction and favorable weight-to-power ratio. However, they suffer significantly in the area of combustion, where part of the fresh mixture escapes into the exhaust system. Therefore, it is important to study the phenomenon known as backpressure. By optimizing the backpressure of the exhaust system, higher combustion efficiency should be achieved. Since the need to improve combustion efficiency is a major concern from both economic and environmental perspectives, exhaust system optimization is essential. The aim is to determine, through the proposed testing on the P63 engine from a Trabant vehicle and the DLA 63 RC model engine, whether a well-designed exhaust system can help reduce these issues. The results demonstrate that a properly designed expansion chamber or correctly applied exhaust throttling can contribute to reducing fuel consumption and increasing combustion efficiency. At the same time, it is evident that an improperly designed exhaust system can worsen the addressed issues. The conclusions drawn from these experiments can serve in the future as a basis for improving combustion efficiency in practical applications of two-stroke engines.!

Keywords

Two-stroke engine, backpressure, fuel consumption

1. Úvod

Dvojdobé spaľovacie motory sú významnou skupinou pohonných jednotiek, ktoré sa najčastejšie využívajú v odvetviach, kde sú kľúčové nízka hmotnosť, jednoduchá konštrukcia a vysoký výkon v pomere k hmotnosti. Ich typické využitie zahŕňa ľahkú dopravu, poľnohospodárske stroje, prenosné zariadenia a modelárstvo. Vďaka svojej jednoduchej konštrukcii, menšiemu počtu pohyblivých častí a nižším nákladom na výrobu si dvojdobé motory zachovali svoju relevanciu aj napriek narastajúcemu tlaku na ekologizáciu a postupnému nárastu elektrických pohonov. Jedným z hlavných nedostatkov dvojdobých motorov je ich nízka účinnosť spaľovania. Počas vyplachovania sa často stráca časť čerstvej palivovo-vzduchovej zmesi do výfukového systému, čo zvyšuje spotrebu paliva a emisie. Tento jav je úzko spojený s dynamikou prúdenia plynov a najviac ho ovplyvňuje spätný tlak vo výfukovom systéme. Spätný tlak pôsobí ako odpor pre unikajúce spaliny a čerstvú zmes, a jeho správna optimalizácia môže významne zvýšiť účinnosť motora. Rôzne riešenia, ako expanzné komory, špeciálne ladené výfukové potrubia alebo regulované škrtenie výfukového prúdu, sa snažia v správny čas minimalizovať straty čerstvej zmesi a zlepšiť jej využitie v spaľovacom priestore. Cieľom tejto štúdie je preskúmať vplyv rôznych úprav výfukového systému na spotrebu paliva a efektívnosť spaľovania v dvojdobých motoroch. Výskum bol vykonaný na dvoch motoroch – automobilovom motore P63 z automobilu Trabant 601 a modelárskom motore DLA 64 RC. Počas testovania boli analyzované účinky sériového výfuku, použitie expanznej komory a rôzne úrovne škrtenia výfuku. Výsledky tohto výskumu môžu prispieť k lepšiemu návrhu výfukových systémov pre dvojdobé motory s cieľom znížiť

spotrebu paliva a zlepšiť environmentálnu udržateľnosť ich prevádzky.

2. Metodika a metódy skúmania

Experimentálna časť výskumu sa sústredila na dôkladné testovanie účinnosti rôznych konfigurácií výfukového systému v kontrolovaných reálnych podmienkach. Testovanie bolo navrhnuté tak, aby sa eliminovali vonkajšie faktory a zabezpečili sa reprodukovateľné a porovnateľné výsledky. Každá konfigurácia výfukového systému bola inštalovaná samostatne a motor bol prevádzkovaný v ustálenom režime. Každý merací cyklus zahŕňal viaceré opakovania, aby sa minimalizovali náhodné chyby a zvýšila sa štatistická spoľahlivosť získaných údajov. Namerané hodnoty boli zaznamenané a analyzované v porovnateľných podmienkach pre jednotlivé konfigurácie. Cieľom bolo experimentálne preskúmať vplyv spätného tlaku pri použití expanzných systémov a škrtenia výfuku na spotrebu paliva dvojdobých motorov. Testovanie bolo vykonané na dvoch rôznych motoroch: tradičnom dvojdobom motore P63 z vozidla Trabant 601 a modernom modelárskom motore DLA 64 RC.

2.1. Použité motory

Motor P63

Motor P63 je dvojvalcový, dvojdobý benzínový motor so zdvihovým objemom 594 cm³, ktorý bol pôvodne navrhnutý na pohon automobilu Trabant 601. Tento motor má radové usporiadanie valcov, je chladený vzduchom pomocou ventilátora a dosahuje maximálny výkon 19,1 kW pri 4200 otáčkach za minútu. Používa karburátor BVF 28 HB 2-7 a disponuje elektronickým zapáľovaním. Mazanie je realizované

zmiešaním benzínu s olejom v pomere 1:50. Suchá hmotnosť motora je približne 56 kg a jeho rozmery sú 440 × 415 × 600 mm. Vďaka jednoduchej konštrukcii a robustnosti a ľahko modifikovateľnej konštrukcii bol motor ideálnou voľbou na experimentálne testovanie účinku výfukových systémov na spätný tlak a spotrebu paliva.

2.1.1. Priebeh testovania na motore P63



Obrázok 1 Motor P63 s rezonančnou komorou
Zdroj: [autor]

Testovanie motora P63 zahŕňalo systém expanznej komory, ktorý by mal ovplyvniť spotrebu paliva pri vysokých otáčkach, a systém škrtenia výfukového potrubia škrtiacou klapkou, ktorý by mal ukázať zmenu spotreby paliva pri nízkych a stredných otáčkach. Testovanie bolo rozdelené do troch fáz:

1. Testovanie v sériovej konfigurácii – táto fáza zabezpečila kontrolné dáta na porovnanie s ostatnými fázami merania. Spočívala v sledovaní spotreby paliva v sériovej konfigurácii motora, kde výfukový systém neobsahuje expanznú komoru ani škrtiacu klapku.
2. Testovanie v konfigurácii s expanznou komorou – v tejto fáze sa sledoval vplyv rezonančnej komory na spotrebu paliva. Motor sa nastavil tak, že za zvodmi výfukového systému bola pripojená rezonančná komora, avšak škrtiaca klapka ešte nebola prítomná. To by malo zvýšiť spätný tlak vo výfukovom systéme.
3. Testovanie v konfigurácii kombinácie expanznej komory a škrtiacej klapky – nakoniec sa za rezonančnú komoru pridala škrtiaca klapka, ktorá by mala ešte viac zvýšiť spätný tlak vo výfukovom potrubí. Cieľom bolo pozorovať spotrebu paliva pri použití kombinácie škrtiacej klapky a expanznej komory.

Navrhnutý model testovania nebolo možné uskutočniť z dôvodu náročnosti manipulácie s palivovou nádržou. Ako bolo zistené, tá bola ku konštrukcii motorového stojanu pripojená celkom napevno, čo takmer znemožňovalo manipuláciu s ňou. Navrhovaný postup váženia nádrže nemohol byť teda realizovaný. Z tohto dôvodu sa rozhodlo pristupovať k meraniu spotreby formou sledovania a úpravy časovania vstrekov. Cieľom tejto metódy bolo sledovať aké časovanie je potrebné pre udržanie dve tisíc osem sto a štyri tisíc otáčok za minútu.

Zároveň sa sledovali aj tlakové zmeny v zvodoch výfukového systému.

Postup merania bol nasledujúci: najprv sa škrtiaca klapka karburátora nastavila do nulovej polohy, čo znamená, že bola maximálne uzavretá. V ďalšom kroku, po naštartovaní motora, sa táto klapka otvorila tak, aby sa otáčky motora priblížili k štyrom tisícom. Je potrebné zdôrazniť, že počas všetkých fáz testovania bola škrtiaca klapka vždy otvorená o tri a pol otočenia nastavovacej voľnobežnej skrutky. Na záver sa upravilo časovanie vstrekovania paliva tak, aby otáčky motora dosahovali požadovanú hodnotu, s toleranciou plus mínus päťdesiat otáčok za minútu. Pri meraniach s otáčkami dvetisíc osemsto bol postup viac-menej rovnaký, s tým rozdielom, že nastavenie voľnobežnej skrutky zostalo vždy na nule.

Počas testovania motora P63 boli zaznamenané sťažnosti na hluk motora. Z tohto dôvodu sa rozhodlo spraviť aj merania hlučnosti motora vzhľadom na danú konfiguráciu motora. Na ich vyriešenie bolo potrebné opäť upraviť výfuk a doplniť ho o tlmič hluku. Najprv sa preskúmala konštrukcia dostupného tlmiča. Rozrezaním tejto súčiastky sa zistilo, že ide o najjednoduchší typ bez zakomponovaného rebrovania. Pre zvýšenie efektivity tlmenia hluku boli z plechového plátu vyrezané dve priečky v tvare tlmiča, do ktorých boli následne vyvŕtané otvory. Každá priečka mala rôznu veľkosť otvorov, čo malo zabezpečiť rozptýl väčšieho množstva frekvencií. Pri konštruovaní tohto systému bolo však potrebné dbať na správny počet otvorov, aby sa zabezpečila rovnosť súčtu veľkostí plôch všetkých otvorov s veľkosťou plochy na priereze výfukového potrubia. Týmto spôsobom by sa mal eliminovať nežiadúci škrtiaci účinok tlmiča výfuku. Nakoniec bol tlmič zvarením opäť uzavretý a pripojený za expanznú komoru. Pri meraní sa postupovalo tak, že sa v každej konfigurácii motora položil zvukomer do vzdialenosti 0,8 metra a 4,2 metra od konca výfukového potrubia.

Motor DLA 64 RC

Motor DLA 64 RC je moderný dvojvalcový dvojdobý motor typu boxer s protifalým usporiadaním valcov určený pre RC modely lietadiel. Má objem 64 cm³, elektronické CDI zapáľovanie a membránový karburátor Walbro. Dosahuje výkon 5,37 kW (7,2 konských síl) pri 7500 otáčkach za minútu. Vŕtanie a zdvih predstavujú 37 mm × 30 mm. Suchá hmotnosť motora je 1700 g, pričom rozmery sú 205 × 135 × 125 mm. Tento motor bol vybraný pre svoje kompaktné rozmery a jednoduchú konštrukciu výfukového systému, čo umožnilo detailné sledovanie účinku škrtenia výfuku bez významného ovplyvnenia dynamiky systému.



Obrázok 2 Motor DLA 64 RC
Zdroj: [autor]

2.1.2. Priebeh testovania na motore DLA 64 RC

Cieľom tohto testovania bolo analyzovať správanie spotreby paliva pri použití systému škrtiacej klapky bez integrácie expanznej komory. Letecké motory dosahujú vysoké otáčky len počas krátkych letových fáz, ako sú vzlet a stúpanie, preto inštalácia expanznej komory pre toto odvetvie nie je opodstatnená. Avšak modelárske motory bežia väčšinu času na plné otáčky, takže v tomto odvetví by to svoj význam malo. Expanzná komora je však pomerne veľká a jednoducho by sa na konkrétny motor nezmestila. Väčšinu času klasický letecký motor funguje na stredných otáčkach v hladine alebo na nízkych otáčkach pri pristávaní a klesaní, kde by použitie škrtiacej klapky malo najväčší prínos. Ďalším faktorom je, že celková hmotnosť letúna je pri leteckých motoroch veľmi dôležitá. Pridaním expanznej komory by sa zvýšila hmotnosť, čo by negatívne ovplyvnilo celkovú hmotnosť letúna. Testovanie motora DLA 64 RC bolo rozdelené do dvoch fáz:

1. Testovanie v sériovej konfigurácii – táto fáza sa zameriavala na vykonanie kontrolných meraní, ktoré slúžili na porovnanie s meraniami z druhej fázy. Sledovala sa spotreba paliva pri použití konvenčného výfukového systému, bez škrtiacich klapiek.
2. Testovanie v konfigurácii so škrtiacimi klapkami – v tejto fáze sa do oboch koncov konvenčného výfukového systému nainštalovali škrtiace klapky a skúmal sa ich vplyv na spotrebu paliva.

Testovanie motora DLA 64 RC sa uskutočnilo podľa predpísanej metódy. Najprv boli na palivovej nádrži motora zakreslené tri čiary po 1,3 centimetri, ktoré ju rozdelili na rovnaké časti s objemom 122,304 cm³. Po natankovaní palivovej nádrže sa prvý dielik využíval výhradne na zahriatie motora na prevádzkovú

teplotu, aby sa predišlo skresleným výsledkom spôsobeným nesprávnou teplotou motora (studený motor má vyššiu spotrebu paliva) a rozdielom v objeme spôsobených rôznym množstvom paliva po dotankovaní. Následne sa uskutočnili merania pri 6900 otáčkach za minútu (plný plyn), 5800 otáčkach za minútu (stredné otáčky) a 4800 otáčkach za minútu (nízke otáčky) v sériovej konfigurácii, pri ktorých sa merala časová jednotka za ktorú motor spotreboval 1 dielik paliva. Po ukončení tejto fázy boli do výfukového systému pridané škrtiace klapky, ktoré boli vyrobené zo skrutiek s priemerom 18 milimetrov, čo zodpovedalo priemeru konca výfukového potrubia. Do týchto skrutiek boli následne vyvrtané otvory s priemerom 13 milimetrov, čím došlo k zmenšeniu prierezu o 47,9%. Následne boli vytvorené škrtiace klapky s priemerom 12 milimetrov, čo spôsobilo zmenšenie prierezu o 55,6%. Tieto priemery boli zvolené z dvoch dôvodov. Prvým bola nedostupnosť vrtáku s priemerom väčším ako 13 milimetrov. Druhým dôvodom boli obavy z poškodenia motora v dôsledku vrtania otvorov menších ako 12 milimetrov, pretože menší prierez výfukového potrubia zvyšuje spätný tlak, ktorý môže spôsobiť praskliny vo valci a vážne poškodenie motora. Do výfuku boli následne vyvrtané dve malé diery, cez ktoré bol prestrčený drôt, ktorý zabráňoval škrtiacim klapkám opustiť výfukové potrubie a postup merania sa opakoval.

Rovnako ako pri predchádzajúcom motore, aj v tomto prípade sa rozhodlo o meraní hluku motora. Cieľom tohto merania bolo zistiť, či škrtenie ovplyvňuje hlučnosť motora. Testovanie sa vykonalo tak, že sa za motor umiestnil zvukomer, ktorý zaznamenával úroveň hluku pri oboch konfiguráciách motora pri plnom plyne.

3. Výsledky

Analýza výsledkov získaných pri meraniach sa sústreďuje na meranie spotreby paliva, správanie motorov pri stabilných otáčkach a kvalitu chodu v rôznych testovacích nastaveniach. Budú porovnávané účinky sériového vyhotovenia, optimalizovanej expanznej komory, kombinácie expanznej komory a škrtenia, ako aj samotného škrtenia výfuku. Výsledky budú hodnotené nielen z hľadiska absolútnej spotreby paliva, ale aj z pohľadu účinnosti spaľovania, vplyvu spätného tlaku na výkon a úrovne hlučnosti. Analýza prinesie kľúčové poznatky na podporu alebo vyvrátenie stanovených hypotéz.

3.1. Výsledky testovania motora P63

Tabuľka 1 Časovanie vstrekovania v závislosti od konfigurácie motora a otáčok motora

Otáčky motoru [ot./min]	Časovanie vstrekovania v sériovej konfigurácii [ms]	Časovanie vstrekovania v konfigurácii s expanznou komorou [ms]	Časovanie vstrekovania v konfigurácii s expanznou komorou a 23% škrtením [ms]	Časovanie vstrekovania v konfigurácii s expanznou komorou a 31% škrtením
4000 +/- 100	1,89	1,78	2,02	2,07
2800 +/- 100	-	1,64	1,80	-

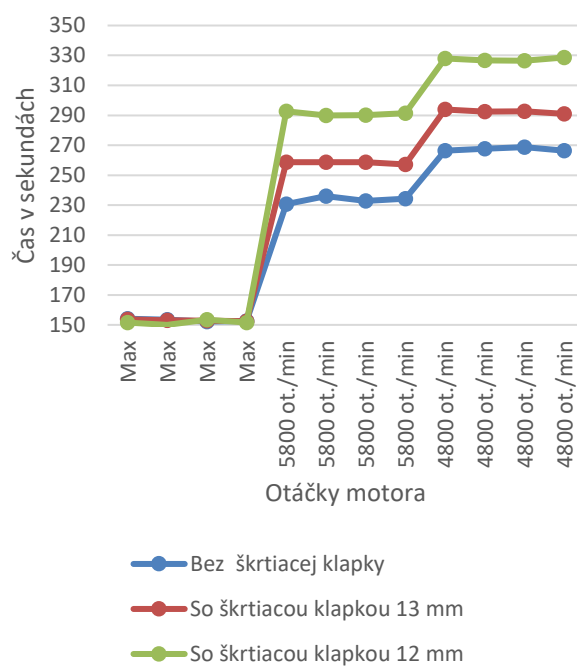
Zdroj: [autor]

V tabuľke 1 sú zobrazené výsledky štyroch meraní časovania vstrekovania pri 4000 otáčkach za minútu. Všetky testovacie podmienky boli rovnaké, pričom škrtiacia klapka karburátora bola nastavená na tri a pol otočenia od nulovej pozície. Rovnako bola pri každom meraní udržiavaná začiatočná teplota 80°C, čo eliminovalo možné odchýlky. Zmenou časovania vstrekovania sa dosiahol chod motora na 4000 otáčok za minútu a zaznamenala sa hodnota tohto časovania. Z výsledkov v tabuľke 1 vyplýva, že motor mal najnižšiu spotrebu a najmenej stráť palivovej zmesi do výfukového potrubia pri konfigurácii s expanznou komorou. To naznačuje, že motoru stačí pri rovnakých otáčkach kratší čas vstrekovania ako bez expanznej komory. Možno teda konštatovať, že expanzná komora je efektívna na optimalizáciu vyplachovania pri vysokých otáčkach a mierne zlepšuje výkon pri nižšej spotrebe paliva. Pri meraní spätného tlaku bolo zistené jeho mierne zvýšenie, avšak presnú hodnotu nebolo možné určiť kvôli veľkému rozsahu ciferníka. Na druhej strane, pri konfigurácii s expanznou komorou a škrtением sa ukázalo, že na udržanie 4000 otáčok za minútu je potrebný dlhší čas vstrekovania, čo naznačuje, že fáza výplachu nebola optimálna a do výfukového potrubia unikalo viac paliva ako v sériovej konfigurácii. Opäť však bolo zaznamenané mierne zvýšenie spätného tlaku pri meraní. Zvýšená spotreba paliva môže byť spôsobená fenoménom nazývaným "over-scavenging", pri ktorom dochádza k významnému úniku palivovej zmesi do výfukového potrubia v dôsledku nesprávne načasovaných zvukových vln v rezonančnej komore. Tento fakt je podporený aj zisteniami, že zvukové vlny neboli optimálne načasované ani pri testovaní kombinácie škrtения a expanznej komory pri 2800 otáčkach za minútu. Z tabuľky 1 je možné pozorovať, že v tomto prípade je potrebný dlhší čas na vstrekovanie v porovnaní s konfiguráciou, kde bola použitá iba rezonančná komora. To naznačuje, že správna geometria expanznej komory a adekvátne množstvo škrtения výfukového potrubia sú kľúčové pre efektívne fungovanie vyplachovania v dvojdobých motoroch. Optimalizácia týchto komponentov môže viesť k zlepšeniu spotreby paliva a tým aj k zvýšeniu ekologickosti motora.

Z výsledkov hlukových meraní je možné konštatovať, že pridaním rezonančnej komory sa mierne zvyšujú hlukové emisie motora P63, a to o 8,1 decibelu pri vzdialenosti 0,8 m od konca výfukového systému a o 4,3 decibelu pri vzdialenosti 4,2 m. Tento jav môže byť spôsobený schopnosťou rezonančnej komory odrážať zvukové vlny od stien späť do valca, čo napomáha zatlačaniu nespotrebovanej zmesi späť do valca. Časť zvukových vln môže pokračovať potrubím von z výfukového systému, čím sa zvyšujú hlukové emisie motora. Avšak, ak sa k expanznej komore pridá aj tlmič výfuku, je možné dosiahnuť zníženie týchto emisií, a to až o 22,8 decibelov pri vzdialenosti 0,8 m od konca výfukového potrubia a 11,7 decibelov pri vzdialenosti 4,2 m. Možno teda konštatovať, že aj keď rezonančná komora zvyšuje hlukové emisie, pridaním tlmiča výfuku je možné ich regulovať.

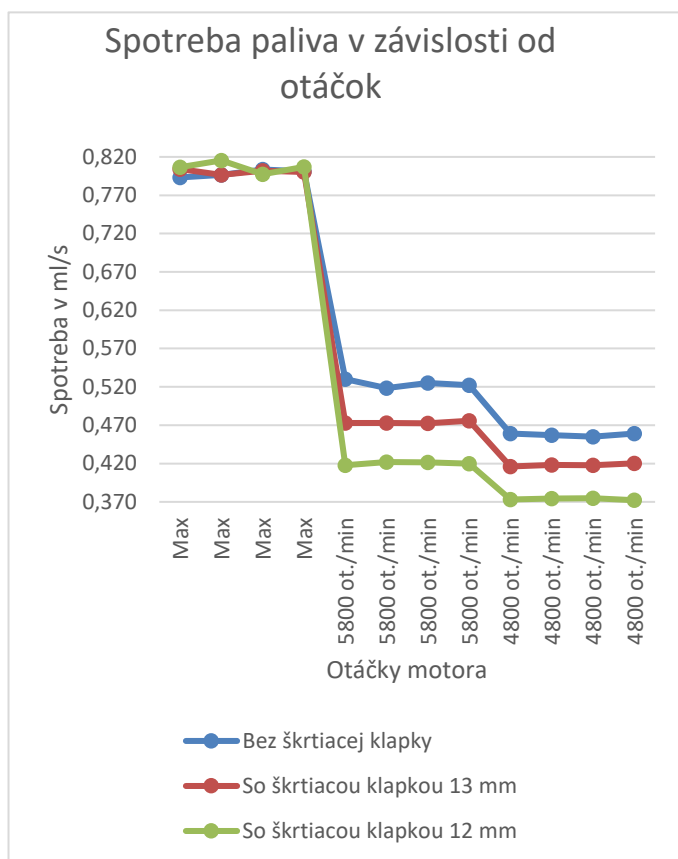
3.2. Výsledky testovania motora DLA 64 RC

Potrebný čas pre spotrebovanie jedného dielika v závislosti od otáčok



Obrázok 3 Graf času potrebného na spotrebovanie jedného dielika paliva v závislosti od otáčok

Zdroj: [autor]



Obrázok 4 Graf spotreby paliva vzhľadom od otáčok motora. Zdroj: [autor]

Pri meraní času boli uskutočnené experimenty pri troch rôznych nastaveniach otáčok motora. Konkrétne sa jedná o hodnoty 6900, 5800 a 4800 otáčok za minútu, pričom boli testované konfigurácie bez škrtiacej klapky, s klapkou s priemerom 13 mm a s klapkou s priemerom 12 mm. Je potrebné zdôrazniť, že zvýšený spätný tlak spôsobený škrtiacou klapkou s priemerom 13 mm znížil otáčky motora pri plnom plyne z 6900 na 6650. Rovnako pri použití klapky s priemerom 12 mm došlo k zníženiu otáčok motora pri plnom plyne z 6900 na 6500. Z tohto dôvodu sú tieto otáčky ďalej označované ako maximálne otáčky.

Z obrázkov 3 a 4 je zrejmé, že zníženie otáčok v rámci rovnakej konfigurácie viedlo k predpokladanému predĺženiu času potrebného na spotrebovanie paliva jedného dielika nádrže s objemom 122,304 mililitrov. Pri porovnaní hodnôt pri 5800 a 4800 otáčkach za minútu sa taktiež ukazuje nárast časového intervalu potrebného na spotrebovanie jedného dielika. Pri 5800 otáčkach za minútu, v prípade škrtienia s klapkou s priemerom 13 mm, došlo v priemere k nárastu času o 9,4% a zodpovedajúcemu zníženiu spotreby paliva v porovnaní so sériovou konfiguráciou. Pri 4800 otáčkach sme zaznamenali priemerný nárast času o 8,6% a rovnaké zníženie spotreby. Pri porovnaní 5800 otáčok za minútu medzi sériovou konfiguráciou a škrtiením s klapkou s priemerom 12 mm bol zistený nárast potrebného času a zníženie spotreby v priemere až o 19,7%. Pri 4800 otáčkach to bolo v priemere až o 18,2%. Z pozorovaní

môžeme tiež usúdiť, že pri nižších otáčkach motora začína účinnosť spätného tlaku klesať. Vzhľadom na to, že pri nižších otáčkach je časový interval spaľovacieho cyklu dlhší, tlaková vlna sa nemusí stihnúť vrátiť späť pred uzavretím výfukového kanála, čo môže viesť k zvýšeniu strát palivovej zmesi do výfukového potrubia. Vo všeobecnosti možno konštatovať, že aj pri tomto nastavení motora zostáva škrtienie veľmi efektívne. Pri maximálnych otáčkach nebola pozorovaná významná zmena v časovom okne medzi sériovou konfiguráciou a konfiguráciou so škrtiacimi klapkami, pretože škrtienie výfukového potrubia zlepšuje vyplachovanie len pri nízkych a stredných otáčkach.

Na základe dostupných informácií je možné uviesť, že obmedzenie výfuku viedlo k značnému zníženiu spotreby paliva a môže byť využité na optimalizáciu vyplachovania pri nízkych a stredných otáčkach. Okrem toho, dosiahnutá významná redukcia spotreby paliva prostredníctvom samotného škrtienia výfukového systému robí tento prístup ideálnym pre letecké motory. Absencia potreby rezonančnej komory podstatne znižuje hmotnosť a zložitosť celého systému.

Hluk motora bol zaznamenávaný za motorom v závetrí vo vzdialenosti 40 centimetrov pri maximálnych otáčkach vo všetkých konfiguráciách. Merania ukázali, že pri sériovej konfigurácii dosahoval hluk 118 decibelov +/- 2 decibely. Pri použití 13 mm škrtiacej klapky sa tento údaj znížil na 112 decibelov +/- 2 decibely a pri 12 mm škrtiacej klapke na 109 decibelov +/- 2 decibely. Tieto výsledky naznačujú, že škrtienie motora prispieva nielen k zníženiu spotreby, ale aj k znižovaniu hlukových emisií motora.

4. Záver

V predloženej štúdii bol analyzovaný vplyv spätného tlaku výfukového systému na proces vyplachovania a spotrebu paliva v dvojdobých motoroch. Osobitná pozornosť bola venovaná vplyvu geometrie výfukového systému na účinnosť spaľovania, ako aj návrhu a funkcii expanzných komôr a vplyvu škrtienia výfuku. V praktickej časti boli vykonané experimenty na dvojdobých motoroch P63 z automobilu Trabant 601 a DLA 64 RC. Merania potvrdili, že optimalizovaná expanzná komora dokáže znížiť spotrebu paliva pri rovnakých otáčkach motora v porovnaní so sériovou konfiguráciou. Zistilo sa tiež, že samotné škrtienie môže mať pozitívny vplyv na vyplachovanie valca a znížiť spotrebu až o 19,7%. Na druhej strane, nesprávne navrhnuté alebo nadmerné škrtienie výfuku vedie k zvýšeniu spotreby paliva a zníženiu výkonu motora. Výsledky naznačili aj priaznivý vplyv škrtienia výfukového systému na hlukové emisie motora a potvrdili teoretické predpoklady o význame správneho kontrolovania spätného tlaku v dvojdobých motoroch. Tieto zistenia môžu mať praktický význam nielen pri optimalizácii výfukových systémov starších vozidiel a leteckých motorov, ale aj z hľadiska zníženia spotreby paliva a emisného zaťaženia životného prostredia. V širšom celospoločenskom kontexte štúdia zdôrazňuje možnosti efektívneho zlepšenia parametrov existujúcich dvojdobých motorov, ktoré sú stále významne využívané v mnohých oblastiach. Na záver možno konštatovať, že ciele boli úspešne splnené. Potvrdila sa dôležitosť správneho návrhu a ladenia výfukového systému pre optimalizáciu spotreby a výkonu dvojdobých motorov. Získané poznatky môžu slúžiť ako základ pre ďalší výskum alebo praktické aplikácie v oblasti úprav motorov.

Referencie

JENNINGS, Gordon. *Two-Stroke Tuner's Handbook*. 2. vyd. Los Angeles: HP Books, 1973. ISBN 978-0912656410.

BLAIR, Gordon P. *The Basic Design of Two-Stroke Engines*. Warrendale: SAE International, 1990. ISBN 978-1560910088.

BELL, Graham. *Two-Stroke Performance Tuning*. 2nd ed. Newbury Park: Haynes Publishing, 1999. ISBN 978-1859606193.

ŠLEHOFER, Jaroslav. *Údržba a opravy vozů Trabant 600 a 601*. 1. vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. ISBN 04-238-84



UMELÁ INTELIGENCIA AKO ĽUDSKÝ FAKTOR V LETECTVE

Alexandra Štrauchová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Patrik Veľký
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This paper aims to examine the role of artificial intelligence (AI) in aviation, with a particular focus on its impact on decision-making and safety. The objective of the paper is to analyse the development and current state of AI technologies, including machine learning and deep learning, and to assess their application across various areas of aviation. The paper highlights the integration of AI in aircraft design and manufacturing, air traffic management, airport operations, and emerging air mobility systems such as drones and U-space. Special attention is given to the legal, ethical, and safety implications associated with AI adoption in aviation environments. The paper also addresses the interaction between human operators and AI technologies, particularly in cockpits, maintenance processes, and air traffic control. In conclusion, the paper outlines the potential benefits and challenges of AI in aviation and provides insight into its future direction and further development in the field.

Keywords

artificial intelligence, aviation, human factor, safety, decision-making

1. Úvod

Letecká doprava predstavuje jeden z kľúčových pilierov moderného dopravného systému a technologického pokroku. Je charakteristická vysokými nárokmi na efektívnosť, spoľahlivosť, bezpečnosť a inováciu. V súčasnosti čelí odvetvie civilného letectva viacerým výzvam, ktoré nesúvisia len s narastajúcim objemom prevádzky, ale aj s potrebou znižovania environmentálnej záťaže, optimalizácie procesov a zvyšovania bezpečnostných štandardov. Umelá inteligencia sa v tomto kontexte javí ako perspektívny nástroj na zvládanie týchto výziev. Ide o dynamicky sa rozvíjajúcu oblasť informačných technológií, ktorá nachádza čoraz širšie uplatnenie aj v letectve. Moderné systémy využívajúce umelú inteligenciu umožňujú automatizáciu zložitých procesov, predikciu porúch, podporu rozhodovania a zvyšovanie úrovne bezpečnosti v rôznych oblastiach – od návrhu a výroby lietadiel, cez plánovanie letov, údržbu a riadenie letovej prevádzky, až po zlepšovanie služieb pre pasažierov.

Vysoká komplexnosť leteckého sektora však prináša viaceré technologické, legislatívne, etické aj organizačné otázky spojené s implementáciou umelej inteligencie. Z tohto dôvodu je nevyhnutné skúmať úlohu umelej inteligencie v letectve so zameraním na jej vplyv na rozhodovacie procesy a bezpečnosť. Cieľom článku je identifikovať oblasti, v ktorých je umelá inteligencia už implementovaná, analyzovať jej potenciál pre ďalšiu integráciu a venovať sa aspektom dôveryhodnosti, etiky a právneho rámca, ktorý má zabezpečiť jej bezpečné a zodpovedné použitie.

Článok vychádza z aktuálnych poznatkov v oblasti vývoja technológií umelej inteligencie, z príslušnej európskej legislatívy a prípadových štúdií implementácie umelej inteligencie v leteckej praxi. Cieľom je poskytnúť komplexný prehľad možností a rizík súvisiacich s využívaním umelej inteligencie v letectve a zároveň zdôrazniť potrebu udržať rovnováhu medzi

technologickým pokrokom a nezastupiteľnou úlohou človeka ako súčasť systému leteckej bezpečnosti.

2. História a vývoj umelej inteligencie

Koncept umelej inteligencie má svoje filozofické korene už v 17. storočí, keď René Descartes uvažoval o možnosti, že stroje by v budúcnosti mohli vykazovať známky inteligentného správania a autonómneho rozhodovania. No až v 50. rokoch 20. storočia nastal skutočný vedecký rozvoj, keď Alan Turing vo svojej štúdií *Computing Machinery and Intelligence* predstavil takzvaný Turingov test. Ide o metodologický rámec na hodnotenie schopnosti stroja simulovať ľudskú konverzáciu [1].

Za kľúčovú je považovaná konferencia, ktorá sa konala na Dartmouth College v roku 1956, kde John McCarthy definoval pojem „umelá inteligencia“ a spolu s ďalšími odborníkmi načrtnol víziu vývoja inteligentných systémov. Táto udalosť je považovaná za oficiálny začiatok umelej inteligencie ako akademickej disciplíny. V nasledujúcich dekádach sa výskum zameriaval na vytváranie základných modelov inteligentného správania. Za významný je považovaný model *Perceptron* z roku 1957, ktorý položil základy neuronových sietí a strojového učenia. Systém *ELIZIA* je prvý jednoduchý konverzačný systém, ktorý vznikol v roku 1966 a demonštruje schopnosť spracovania prirodzeného jazyka. Za ďalší významný míľnik je považovaný systém *Deep Blue*, ktorý v roku 1997 porazil svetového šampióna v šachu. To predstavovalo prelom v oblasti aplikácie výpočtového výkonu a algoritmickej optimalizácie [2].

V 21. storočí došlo k prudkému rozvoju umelej inteligencie vďaka dostupnosti veľkých objemov dát, zvýšenej výpočtovej kapacity a pokroku v oblasti hlbokého učenia. Tieto faktory zásadným spôsobom prispeli k rozšíreniu umelej inteligencie do širokého spektra priemyselných odvetví vrátane letectva, kde zohráva čoraz významnejšiu úlohu pri optimalizácii procesov, zvyšovaní bezpečnosti a podpore rozhodovania v komplexných systémoch [1].

3. Základné vymedzenie umelej inteligencie

V súčasnosti neexistuje jednotná a presne stanovená definícia pojmu umelá inteligencia. No aj napriek tomu je možné tento pojem vymedziť ako oblasť, ktorá umožňuje zariadeniam vykonávať úlohy vyžadujúce vlastnosti podobné ľudskému mysleniu, medzi ktoré patrí schopnosť učiť sa, analyzovať informácie, riešiť problémy, strategicky plánovať či prispôbovať svoje správanie aktuálnym podmienkam. Jej prítomnosť je často pre používateľov neviditeľná no aj napriek tomu sa stala neoddeliteľnou súčasťou každodenného života. Systémy umelej inteligencie sú schopné autonómne vykonávať úlohy a zároveň prispôbovať svoje správanie na základe spätnej väzby, získanej z predchádzajúcich akcií. Ich významnou prednosťou je schopnosť spracovávať rozsiahle množstvo dát a učiť sa z nich, čím sa priebežne zvyšuje ich presnosť a efektivita [3].

Pohľad na definovanie umelej inteligencie sa v literatúre rôzni. Niektorí autori ju opisujú ako vednú a inžiniersku disciplínu, ktorej cieľom je vývoj inteligentných strojov a softvéru schopného imitovať ľudské myslenie a správanie. Iní odborníci chápu umelú inteligenciu ako komplexný systém, ktorý sa sústreďuje na skúmanie procesov prebiehajúcich v ľudskej myslí s cieľom vytvárať riešenia umožňujúce inteligentné spracovanie informácií a samostatné rozhodovanie. Spoločným znakom všetkých definícií je dôraz na schopnosť strojov učiť sa, prispôbovať sa novým podmienkam, rozpoznávať vzorce, racionálne uvažovať a následne aplikovať získané vedomosti pri riešení praktických úloh. Na základe analýzy dostupných poznatkov možno konštatovať, že primárnou úlohou umelej inteligencie je naučiť stroje vykonávať úlohy spôsobom, ktorý čo najvernejšie imituje ľudské správanie a rozhodovanie. Efektívne zvládnutie tohto cieľa je podmienené pochopením princípov ľudského myslenia, procesov učenia a vzorcov správania. Aj napriek tomu, že súčasné systémy umelej inteligencie disponujú vysokou výpočtovou kapacitou a pokročilými algoritmi, stále vykazujú isté obmedzenia v porovnaní s ľudskou myslou. Práve preto zohráva strojové učenie kľúčovú úlohu pri zvyšovaní autonómie a adaptívnosti systémov umelej inteligencie [4].

Úzko špecializovaná umelá inteligencia – alebo aj slabá umelá inteligencia, je navrhnutá na riešenie presne definovaných úloh. Charakteristické pre tento typ systémov je, že ich inteligentné správanie vychádza z vopred definovaných modelov, algoritmov a dostupných tréningových dát. Funkčnosť takýchto systémov je podmienená správnou konfiguráciou a dostupnosťou vstupných údajov, pričom na dosiahnutie požadovaných výsledkov je spravidla potrebný zásah človeka. *Všeobecná umelá inteligencia* – taktiež známa aj ako silná umelá inteligencia je koncipovaná ako systém schopný zvládnuť akúkoľvek intelektuálnu úlohu, ktorú dokáže vykonať človek. V súčasnosti ostáva tento typ umelej inteligencie iba teoretickým konceptom, keďže žiadny z existujúcich systémov nie je schopný úplne nahradiť človeka bez potreby ľudskej spolupráce alebo údržby [5].

Vzhľadom na to, že schopnosť učiť sa a prispôbovať svoje správanie je jednou z hlavných vlastností umelej inteligencie, osobitnú pozornosť si zasluhujú metódy, ktoré tento proces umožňujú a systematicky rozvíjajú. Strojové učenie predstavuje jeden z kľúčových pilierov umelej inteligencie, pretože umožňuje počítačovým systémom samostatne získavať

poznatky zo skúseností, analyzovať veľké objemy údajov a na ich základe prijímať efektívne rozhodnutia. V rámci tejto oblasti sa postupne formovali pokročilejšie prístupy, medzi ktoré patrí aj hlboké učenie, ktoré sa vyznačuje vyššou úrovňou abstrakcie a schopnosťou riešiť zložitejšie úlohy. Oba tieto prístupy zohrávajú v rozvoji umelej inteligencie zásadnú úlohu, keďže podporujú adaptívne správanie systémov a umožňujú ich neustále zlepšovanie v závislosti od aktuálnych podmienok a nových dát.

3.1. Strojové učenie

V rámci strojového učenia rozlišujeme tri základné prístupy, a to učenie pod dohľadom, učenie bez dohľadu a posilňovacie učenie. Učenie pod dohľadom je charakteristické tým, že algoritmus pracuje so súborom označených údajov, kde sú známe vstupy aj príslušné výstupy. Na základe týchto dát systém získava schopnosť identifikovať vzťahy medzi vstupom a očakávaným výsledkom, pričom nadobudnuté poznatky aplikuje pri spracovaní nových, doteraz neznámych údajov. Na rozdiel od učenia pod dohľadom, učenie bez dohľadu využíva iba vstupné, neoznačené dáta. Táto metóda sa uplatňuje najmä v prípadoch, kde nie je vopred definovaná predstava o očakávaných výstupoch. Cieľom učenia bez dohľadu je objaviť skryté vzory, súvislosti či štruktúru v dostupných údajoch a na ich základe generovať nové poznatky. Posilňovacie učenie predstavuje prístup, pri ktorom sa algoritmus zdokonaľuje prostredníctvom skúseností získaných metódou pokus-omyl. Systém pri tejto forme učenia dostáva spätnú väzbu vo forme odmen a trestov, ktoré ho motivujú k preferovanému správaniu a súčasne ho odrádzajú od nežiaducich rozhodnutí. Takýmto spôsobom si algoritmus postupne optimalizuje svoje rozhodovanie a zvyšuje úspešnosť pri riešení zadaných úloh [6].

V rámci strojového učenia zohráva kľúčovú úlohu aj jeho pokročilejšia oblasť, a to hlboké učenie. Ide o metódu, ktorá využíva viacvrstvové neurónové siete, pozostávajúce minimálne z troch vrstiev. Tieto siete spracúvajú informácie logickým spôsobom, ktorý sa približuje princípom ľudského myslenia. Proces učenia môže prebiehať nielen pod dohľadom, ale aj bez neho, pričom sa využíva rozsiahly objem dát a pokročilé algoritmy, ktoré sa priebežne optimalizujú a zvyšujú svoju presnosť na základe nadobudnutých skúseností [7].

3.2. Hlboké učenie

Modely hlbokého učenia sú schopné efektívne riešiť zložité úlohy reálneho sveta a prispôbovať sa dynamicky sa meniacim podmienkam. Táto schopnosť vyplýva z architektúry samotných neurónových sietí, ktoré sú inšpirované biologickými neurónmi ľudského mozgu. V porovnaní so štandardnými metódami strojového učenia sú systémy hlbokého učenia omnoho efektívnejšie a výkonnejšie. Neurónové siete sa skladajú zo vstupnej vrstvy, ktorá prijíma dáta, zo skrytých vrstiev, ktoré realizujú ich analýzu a spracovanie, a z výstupnej vrstvy, ktorá generuje konečný výsledok. Každý uzol v sieti predstavuje umelý neurón, ktorý je prepojený s ďalšími uzlami, pričom jednotlivé prepojenia sú charakterizované váhami a prahovými hodnotami. Aktivácia neurónu nastáva v prípade, ak hodnota výstupu prekročí prahovú hodnotu, pričom výsledok je následne odoslaný do ďalšej vrstvy siete. Ak hodnota prahu nie je dosiahnutá, signál sa ďalej neposielá. Prostredníctvom učenia na

tréninových dátach dochádza k priebežnému zvyšovaniu presnosti modelu, čím sa zefektívňuje jeho využitie v oblasti počítačovej vedy a umelej inteligencie. Väčšina neurónových sietí využívaných v hlbokom učení funguje na princípe dopredného prúdenia údajov, kde sa informácie pohybujú jednosmerne — od vstupnej vrstvy k výstupnej. Proces tréningovania modelu môže byť doplnený metódou spätného šírenia chyby, ktorá umožňuje upravovať váhy jednotlivých neurónov tak, aby sa minimalizovala odchýlka medzi predpovedaným a skutočným výsledkom. Tento prístup výrazne zvyšuje presnosť modelu a jeho výkonnosť pri riešení náročných analytických a predikčných úloh [7].

4. Úloha umelej inteligencie v letectve

Umelá inteligencia transformuje letectvo v mnohých smeroch, od návrhu a prevádzky lietadiel, cez ich výrobu a údržbu, až po riadenie letovej prevádzky, letiskové operácie a integráciu dronov [8].

V oblasti **návrhu a prevádzky lietadiel** umelá inteligencia prináša pokročilých virtuálnych asistentov pre pilotov, automatizuje rutinné úlohy, poskytuje inteligentnú podporu pri rozhodovaní v kritických situáciách a predvída rizikové situácie analýzou prevádzkového prostredia a stavu posádky. Umožňuje optimalizáciu riadenia letu, kalibráciu senzorov, detekciu námrazy a presnejšie vyhodnocovanie paliva. Skúmajú sa hybridné riešenia umelej inteligencie a autonómny let, pričom trh s dronmi a ich aplikácie, ako letecké taxi, slúžia ako inšpirácia. Umelá inteligencia podporuje aj návrh a vývoj leteckých systémov, efektívnejšie testovanie a personalizovaný výcvik posádky [9].

Vo **výrobe a údržbe lietadiel** umelá inteligencia efektívne spracováva rastúce množstvo dát, využíva digitálne dvojčatá, integruje internet vecí a prináša pokrok v prediktívnej údržbe, ktorá dokáže odhaliť aj malé náznaky porúch. Prediktívna údržba zvyšuje dostupnosť lietadiel a je implementovaná poprednými spoločnosťami prostredníctvom systémov ako AIRMAN od Airbusu, AHM od Boeingu, EHM od Rolls-Royce a AVIATAR od Lufthansa Technik [9].

V oblasti **životného prostredia** umelá inteligencia pomáha sledovať emisie v reálnom čase, optimalizovať letové trajektórie na znižovanie uhlíkových emisií a hodnotiť environmentálne dopady pomocou rozsiahlych dátových súborov [9].

V **riadení letovej prevádzky** umelá inteligencia zvyšuje presnosť a predikciu, nepretržite monitoruje prevádzku, efektívnejšie riadi vzdušný priestor, optimalizuje trasy a odhaľuje potenciálne konflikty skôr ako ľudskí kontrolóri. Systémy rozpoznávania hlasu zlepšujú komunikáciu a modely strojového učenia poskytujú odporúčania v reálnom čase. Iniciatíva SESAR testuje rôzne aplikácie umelej inteligencie v tejto oblasti. Príkladmi automatizácie sú systémy SkyGrid, Thales a NASA's ATM-X [9], [10].

Na **letiskách** umelá inteligencia zvyšuje bezpečnosť a efektívnosť prostredníctvom detekcie cudzích predmetov, monitorovania vtáctva a dronov. V terminálových operáciách zlepšuje bezpečnosť, hraničné a colné kontroly pomocou biometrického skenovania a rozpoznávania tváre. Používajú sa skenery s milimetrovými vlnami a systémy na sledovanie batožiny

s umelou inteligenciou, ako napríklad BagsID na letisku v Eindhovene [9], [11].

V oblasti **dronov, U-space a inovatívnej leteckej mobility** je umelá inteligencia kľúčová pre bezpečnú integráciu pilotovaných a bezpilotných lietadiel a pre komplexné operácie s dronmi v dynamických prostrediach. Platforma Innovative Air Mobility Hub a koncept U-space s jeho štyrmi úrovňami služieb (U1-U4) predstavujú budúcnosť riadenia vzdušného priestoru s vysokou mierou automatizácie a digitalizácie [9].

Napokon, **kybernetická bezpečnosť** je kritickou oblasťou, kde umelá inteligencia prináša nové výzvy a hrozby, no zároveň je nevyhnutná na ochranu leteckej infraštruktúry pred kybernetickými útokmi [12].

5. Požiadavky Európskej únie na umelú inteligenciu

Európska komisia vo svojich odporúčaniach týkajúcich sa umelej inteligencie identifikovala sedem základných požiadaviek, ktoré by mali byť splnené pri vývoji, implementácii a používaní systémov umelej inteligencie, aby sa zabezpečilo ich dôveryhodné, etické a spoločensky prijateľné fungovanie [13].

5.1. Ľudský faktor a dohľad

Umelá inteligencia by mala fungovať ako nástroj na podporu ľudského rozhodovania, nie ako jej náhrada. Aby sme mohli považovať umelú inteligenciu za dôveryhodnú je potrebné zabezpečiť možnosť zásahu človeka do jej rozhodovacích procesov. To je možné realizovať rôznymi spôsobmi, ako:

- **Human-in-the-loop** – človek priamo zasahuje do každej fázy rozhodovania umelej inteligencie
- **Human-on-the-loop** – človek systém monitoruje a má možnosť zasiahnuť
- **Human-in-command** – človek má finálnu kontrolu nad celým systémom a rozhoduje o jeho použití.

Cieľom je chrániť základné práva, predchádzať automatizovanému rozhodovaniu s významným dopadom na jednotlivcov a zabezpečiť informované rozhodovanie používateľov [13].

5.2. Technická odolnosť a bezpečnosť

Systémy umelej inteligencie musia byť navrhnuté tak, aby boli odolné voči technickým chybám, kybernetickým hrozbám a zlyháním. Zároveň musia minimalizovať riziko neúmyselných škôd, čo zahŕňa:

- dôkladné testovanie a validáciu algoritmov počas vývoja,
- implementáciu mechanizmov na identifikáciu chýb a automatický prechod do bezpečného stavu,
- zaistenie fyzickej a psychologickej bezpečnosti používateľov integrujúcich so systémom,
- garanciu presnosti a konzistencie výstupov, najmä v citlivých oblastiach ako je aj doprava [13].

5.3. Správa súkromia a údajov

Kľúčovým aspektom dôveryhodnej umelej inteligencie je ochrana osobných údajov. Systémy musia zabezpečiť, že údaje budú spracovávané v súlade s právnymi normami, pričom sa dôraz kladie na:

- minimalizáciu rizika zneužitia údajov,
- zabezpečenie kvality a integrity vstupných údajov,
- prísnu kontrolu prístupu k údajom cez definované dátové protokoly,
- transparentné informovanie používateľov o tom, aké údaje sú zbierané a na aký účel [13].

5.4. Transparentnosť

Transparentnosť zahŕňa nielen technickú výsledovateľnosť rozhodovacích procesov, ale aj zrozumiteľnosť výstupov pre rôzne skupiny používateľov. Používatelia musia vedieť:

- že komunikujú s umelou inteligenciou a nie s človekom,
- akým spôsobom umelá inteligencia dospela k určitému rozhodnutiu,
- prečo bola daná technológia nasadená a aký má dopad na ich práva a každodenný život [13].

5.5. Rozmanitosť, nediskriminácia spravodlivosť

Aby systémy umelej inteligencie konali spravodlivo, musia zohľadňovať potreby a charakteristiky všetkých spoločenských skupín. To vyžaduje:

- dôslednú analýzu a kontrolu dátových súborov,
- zavedenie mechanizmov hodnotenia rozhodovacích procesov,
- konzultácie so zainteresovanými stranami a získavanie spätnej väzby [13].

5.6. Spoločenský a environmentálny blahobyt

Umelá inteligencia by mala byť vyvíjaná tak, aby podporovala spoločenský pokrok, posilňovala medziľudské vzťahy a zároveň nepoškodzovala životné prostredie. Dôraz sa kladie na:

- ekologickú udržateľnosť,
- posudzovanie vplyvov na spoločnosť a verejné zdravie,
- podporu výskumu v oblastiach s vysokým spoločenským prínosom [13].

5.7. Zodpovednosť

Zodpovednosť zahŕňa potrebu zaviesť kontrolné mechanizmy počas celého životného cyklu systémov umelej inteligencie. Medzi základné nástroje patria:

- hodnotenia vplyvu na základné práva a spoločnosť,
- možnosť externého auditu algoritmov a ich výstupov,
- dokumentovanie a analyzovanie etických kompromisov,
- existencia účinných mechanizmov nápravy v prípade negatívnych dopadov na jednotlivcov či skupiny [13].

6. Nariadenie o umelej inteligencii

Nariadenie o umelej inteligencii (EÚ 2024/1689), ktoré nadobudlo účinnosť 1. augusta 2024 a nadobudne plnú platnosť od 2. augusta 2026, predstavuje vôbec prvý komplexný právny rámec zameraný na reguláciu umelej inteligencie na globálnej úrovni. Jeho cieľom je zabezpečiť bezpečné a etické používanie umelej inteligencie v súlade s európskymi hodnotami a základnými právami, pričom sa zároveň podporuje inovácia, hospodárska súťaž a technologický pokrok. Nariadenie zavádza regulačný prístup založený na hodnotení rizika, ktorý rozdeľuje systémy umelej inteligencie do štyroch kategórií: neprijateľné, vysoké riziko, riziká týkajúce sa transparentnosti a minimálne alebo žiadne riziko. Povinnosti vývojárov a používateľov systémov umelej inteligencie sa líšia podľa kategórie rizika, do ktorej konkrétny systém spadá [14].

6.1. Neprijateľné riziko

Systémy umelej inteligencie, ktoré predstavujú vážne ohrozenie základných práv, bezpečnosti alebo dôstojnosti jednotlivcov, sú výslovne zakázané. Ide o praktiky umelej inteligencie, ktoré zneužívajú zraniteľnosť ľudí, manipulujú ich správanie alebo narúšajú dôveru v spoločnosť. Medzi zakázané technológie patria:

- škodlivá manipulácia a podvádzanie prostredníctvom umelej inteligencie,
- škodlivé zneužívanie zraniteľností osôb pomocou umelej inteligencie,
- sociálne hodnotenie jednotlivcov,
- predikcia alebo hodnotenie rizika spáchania trestných činov,
- masové získavanie údajov z internetu či CCTV na rozšírenie databáz rozpoznávania tváří,
- detekcia emócií v pracovnom a vzdelávacom prostredí,
- biometrická kategorizácia na určovanie chránených charakteristík,
- diaľková biometrická identifikácia v reálnom čase na verejných miestach na účely presadzovania práva [14].

6.2. Vysoké riziko

Vysokorizikové systémy umelej inteligencie predstavujú významné ohrozenie zdravia, bezpečnosti alebo základných práv

a preto podliehajú prísny regulacným požiadavkám. Medzi ne patrí:

- Bezpečnostné prvky umelej inteligencie v kritických infraštruktúrach, ktorých porucha prípadne zlyhanie by mohla ohroziť život,
- systémy umelej inteligencie vo vzdelávaní, ktoré ovplyvňujú prístup k štúdiu a kariére,
- riešenia používané v medicíne,
- nástroje na nábor, riadenie zamestnancov a prístup k práci,
- systémy umelej inteligencie určujúce prístup k základným službám,
- biometrická identifikácia, analýza emócií a kategorizácia osôb,
- umelá inteligencia používaná v presadzovaní práva s možným zásahom do základných práv,
- nástroje v oblasti migrácie a hraničných kontrol,
- riešenia podporujúce súdnictvo a demokratické procesy [14].

6.3. Riziko týkajúce sa transparentnosti

Zavádzajú sa špecifické požiadavky na transparentnosť systémov umelej inteligencie, ktoré nespádajú pod vysoké riziko, no ich interakcia s ľuďmi si vyžaduje jasnú komunikáciu o ich používaní. Cieľom je, aby používatelia vedeli, že interagujú s umelou inteligenciou, nie s človekom [14].

6.4. Minimálne alebo žiadne riziko

Systémy, ktoré predstavujú zanedbateľné alebo žiadne riziko, ako napríklad nástroje v oblasti zábavy, odporúčacie algoritmy alebo spamové filtre, nepodliehajú osobitným reguláciám podľa tohto nariadenia. Ich používanie zostáva voľné, bez dodatočných povinností, hoci sa od ich poskytovateľov očakáva dodržiavanie všeobecných pravidiel ochrany údajov a bezpečnosti [14].

7. Analýza problematiky implementovania umelej inteligencie, ako komponent ľudského faktora

Letecká doprava je vysoko komplexný a dynamický systém, kde bezpečnosť zohráva kľúčovú úlohu. Ľudský faktor – teda interakcia medzi človekom a technológiou – predstavuje jeden z najdôležitejších prvkov ovplyvňujúcich bezpečnosť letovej prevádzky. Štatistiky ukazujú, že väčšina nehôd je spôsobená ľudskou chybou. V snahe minimalizovať riziká sa preto čoraz viac integruje umelá inteligencia, ktorá môže pomôcť eliminovať rutinné chyby, zlepšiť presnosť a podporiť rozhodovanie. Aj napriek rastúcim schopnostiam umelej inteligencie však zostáva ľudský úsudok nenahraditeľný – najmä v situáciách, ktoré si vyžadujú intuíciu, skúsenosť a kontextové porozumenie. Preto je dôležité vnímať vzťah medzi človekom a umelou inteligenciou ako synergickú spoluprácu, ktorá umožňuje efektívnejšie zvládanie úloh [15].

Pôvodný heuristický rámec interakcie medzi človekom a strojom, vytvorený v 50. rokoch, bol pre rýchlo sa rozvíjajúce technológie nepostačujúci. Nahradil ho model HABA-MABA-AABA. Tento prístup reflektuje dynamickú povahu technologického vývoja a umožňuje racionálne rozdeliť úlohy podľa toho, ktoré sú vhodnejšie pre ľudí, ktoré pre stroje a ktoré pre systémy umelej inteligencie [16].

Z hľadiska **rýchlosti spracovania** údajov je človek pomalší v porovnaní so strojmi a umelou inteligenciou. Tradičné stroje excelujú najmä v opakujúcich sa činnostiach, zatiaľ čo umelá inteligencia dokáže veľmi rýchlo vykonávať zložité zručnostné a pravidlovo definované operácie [16].

Výkon a konzistentnosť výstupov sú pri človeku ovplyvnené faktormi ako únava či stres, čo vedie k vyššej variabilite. Naopak, stroje a najmä umelá inteligencia vykazujú stabilný výkon počas dlhšieho časového obdobia bez vplyvu mentálneho alebo fyzického vyčerpania. Umelá inteligencia vyniká najmä pri spracovaní veľkých dátových súborov a identifikácii skrytých vzorcov [16].

Pokiaľ ide o **kapacitu spracovania informácií**, ľudský mozog je limitovaný na spracovanie informácií prevažne sekvenčne, zatiaľ čo stroje a umelá inteligencia dokážu pracovať paralelne s viacerými vstupmi. Umelá inteligencia má schopnosť spracovávať rozsiahle a rôznorodé množstvo údajov v reálnom čase [16].

V oblasti **pamäťových schopností** človek efektívne uchováva stratégie a princípy, pričom je schopný inovatívneho prístupu. Tradičné stroje však umožňujú presnú a spoľahlivú reprodukciu údajov, no ich flexibilita je obmedzená. Umelá inteligencia predstavuje kombináciu oboch – disponuje vysokou kapacitou ukladania a efektívnym prístupom k informáciám, čo umožňuje učenie na základe skúseností [16].

Z hľadiska **logického myslenia a výpočtov** je ľudská schopnosť silná v induktívnom uvažovaní a rozpoznávaní chýb, zatiaľ čo stroje a umelá inteligencia dominujú v deduktívnom uvažovaní a výpočtovej presnosti. Umelá inteligencia navyše umožňuje sofistikované predikcie a rozhodovanie na základe komplexnej dátovej analýzy [16].

Pri **snímaní a interpretácii senzorických údajov** ľudia využívajú viacúčelové vnímanie a kontextovú interpretáciu, zatiaľ čo stroje sa sústreďujú na kvantitatívne merania. Umelá inteligencia dokáže integrovať rôzne typy vstupov a vykonávať pokročilú analýzu s rozpoznávaním vzorcov [16].

Napokon, pri **vnímaní variability a šumu** v prostredí má človek schopnosť adaptívneho rozhodovania, hoci je náchylný na vonkajšie rušivé vplyvy. Stroje sú v tomto smere obmedzené, zatiaľ čo umelá inteligencia sa ukazuje ako robustnejší nástroj schopný zachytiť kontext a reagovať primerane aj pri výskyte odchýlok [16].

Dôležitosť vhodnej integrácie umelej inteligencie do leteckých systémov ďalej podčiarkuje Cummingsov model, ktorý kategorizuje úlohy do štyroch hlavných skupín:

- **Úlohy založené na zručnostiach:** Opakujúce sa činnosti ako autopilot alebo navigácia, kde umelá inteligencia dokáže zvýšiť efektívnosť a bezpečnosť

presným spracovaním údajov a vykonávaním manévrov.

- **Úlohy založené na pravidlách:** Vyžadujú aplikáciu jasne definovaných protokolov. Umelá inteligencia tu môže asistovať pilotom pri ich dodržiavaní a ponúkať rozhodovacia podporu, čím znižuje pravdepodobnosť chýb v krízových situáciách.
- **Znalostné úlohy:** Tieto úlohy pracujú s neúplnými alebo nejasnými informáciami. Umelá inteligencia pomáha organizovať a interpretovať veľké množstvo dát, čím zvyšuje kvalitu rozhodovania.
- **Expertné úlohy:** Vyžadujú hlboké odborné znalosti a intuíciu, často v podmienkach vysokej neistoty. Umelá inteligencia tu nemá schopnosť nahradiť človeka, ale môže poskytnúť cennú podporu analýzou údajov a zvýšiť situačné povedomie [16].

Cieľom integrácie umelej inteligencie nie je nahradenie človeka, ale vytvorenie komplementárneho partnerstva, ktoré spája analytické schopnosti umelej inteligencie s ľudským úsudkom a skúsenosťami. Takáto spolupráca môže významne prispieť k zvyšovaniu bezpečnosti a spoľahlivosti leteckej dopravy.

8. Budúcnosť umelej inteligencie

S rastúcim vývojom diaľkovo riadených lietadiel a inteligentných systémov sa čoraz viac diskutuje o budúcnosti ľudskej prítomnosti na kľúčových pozíciách v letectve. Napriek rýchlemu technologickému pokroku zostáva ľudský faktor nepostrádateľný, najmä pre svoju schopnosť zvládať nepredvídateľné situácie. Implementácia plne autonómnych systémov naráža na limity v oblastiach ako adaptabilita, flexibilita a intuícia. Kľúčom k bezpečnej budúcnosti je preto synergická spolupráca človeka a umelej inteligencie [17].

8.1. Vývoj podľa časových horizontov

2025 – 2030

Očakáva sa rast objemu leteckej dopravy a postupné začlenenie umelej inteligencie do podporných systémov – najmä na vykonávanie jednoduchých, opakujúcich sa úloh. Ľudia budú aj naďalej zodpovední za komplexné rozhodnutia. Dôležitým cieľom tohto obdobia je budovanie dôvery medzi človekom a umelou inteligenciou [17].

2030 – 2035

Prichádza prechodná fáza s väčšou komplexnosťou prevádzky. Umelá inteligencia prevezme viac rutinných činností a začne participovať na niektorých komplexnejších úlohách. Úlohy ľudí sa posunú smerom k strategickému rozhodovaniu. Kvalita interakcie medzi človekom a umelou inteligenciou bude rozhodujúca [17].

2035 – 2040

Bežné situácie budú zvládané systémami s umelou inteligenciou. Umelá inteligencia prevezme koordináciu vzdušného priestoru a medzinárodných systémov. Ľudia budú zasahovať najmä v prípade odchýlok alebo kríz [17].

2040 – 2050

Umelá inteligencia získa schopnosť samostatne podporovať rozhodovanie aj v nenormálnych situáciách. Zároveň bude aktívne spolupracovať s ľudskými operátormi. Ľudský faktor zostane kľúčový, no bude sa sústreďovať na strategické plánovanie a dohľad [17]

Do roku 2050 umelá inteligencia zásadne zmení leteckú prevádzku. Vďaka nej bude možné efektívnejšie riadiť rastúcu komplexnosť leteckej dopravy. Mnohé ľudské úlohy prevezmú inteligentné systémy, čo povedie k zániku niektorých pracovných pozícií, transformácii iných a vzniku nových. Ľudský faktor však zostane dôležitý – zameria sa najmä na dohľad nad systémami, riešenie krízových situácií a strategické rozhodovanie.

Záver

Umelá inteligencia sa čoraz výraznejšie uplatňuje v oblasti letectva, kde zvyšuje efektívnosť, spoľahlivosť a úroveň bezpečnosti. Tento článok ukázal, že hoci umelá inteligencia dokáže výrazne podporiť rozhodovacie procesy a automatizovať mnohé činnosti, jej úlohou nie je nahradiť človeka, ale rozšíriť jeho schopnosti. Ľudský faktor zostáva nenahraditeľný najmä v kritických a nepredvídateľných situáciách, kde sú kľúčové skúsenosti, intuícia a schopnosť improvizácie. Vzhľadom na rastúci význam umelej inteligencie je nevyhnutné zaoberať sa aj etickými a právnymi otázkami, ktoré s jej využitím súvisia. Dôvera v systémy umelej inteligencie, ich transparentnosť a bezpečnosť budú zásadné pre ich úspešnú a udržateľnú implementáciu.

Zároveň je však potrebné klásť si otázku: ktoré činnosti by sme mali umelej inteligencii zveriť a ktoré nie? Automatizácia rutinných, opakovateľných a technicky presne definovaných úloh – ako je plánovanie letových trás, monitorovanie technického stavu lietadiel či prediktívna údržba – sa javí ako vhodná a žiaduca. Naopak, rozhodnutia v eticky citlivých alebo morálne nejednoznačných situáciách by mali zostať v rukách človeka. Umelá inteligencia by napríklad nemala autonómne rozhodovať o tom, ktorému lietadlu udeliť prednosť v prípade konfliktu, ak je výsledkom ohrozenie života. Domnievam sa, že hranica medzi tým, čo môžeme prenechať technológii a čo musíme ponechať človeku, sa bude musieť neustále nanovo definovať v kontexte technického pokroku, spoločenských očakávaní a právneho rámca. Budúcnosť letectva bude pravdepodobne charakterizovaná úzkou spoluprácou človeka a technológie. Udržiavanie rovnováhy medzi pokrokom a zodpovednosťou bude kľúčom k tomu, aby umelá inteligencia slúžila ako nástroj na posilnenie bezpečnosti a kvality leteckej dopravy, nie ako jej rizikový prvok

Referencie

1. **LeanIX.** History od AI. *LeanIX*. [Online] [Dátum: 8. február 2025.] https://www.leanix.net/en/wiki/ai-governance/history-of-ai?utm_term=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&utm_campaign=MEE-CEE_Enterprise-Architecture_AO_PMax_ENG&hsa_ver=3&hsa_cam=21523278421&hsa_grp=&hsa_acc=9751618594&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_s

2. **Wagner, Jozef.** História umelej inteligencie (AI) od staroveku až po súčasnosť . *msg*. [Online] 12. júl 2024. [Dátum: 8. február 2025.] https://msg-life.sk/clanky/digitalizacia/historia-umelej-inteligencie/?gclid=CjwKCAiAiOa9BhBqEiwABCDG8wuWqhRps22JRDFjkhGi3MTCjfopHXURVeARJV-5q11ibPBlp1gK1BoCNhoQAvD_BwE.
3. **EASA.** Umelá inteligencia a letectvo. *EASA*. [Online] [Dátum: 8. február 2025.] <https://www.easa.europa.eu/sk/light/topics/artificial-intelligence-and-aviation-0>.
4. **Dr. J. Karthikeyan** . Learning outcomes of classroom research. *Researchgate*. [Online] https://www.researchgate.net/publication/359024128_978-93-92995-15-6.
5. **Šantavý, Peter.** Umelá inteligencia dobrý sluha a zlý pán? [Online] [Dátum: 8. február 2025.] https://peter.santavy.cloud/data/uploads/docs/tftu_ke-ps-ai_dobry_sluha_a_zly_pan.pdf.
6. **Levity.** How do machines learn? *Levity*. [Online] [Dátum: 13. február 2025.] <https://levity.ai/blog/how-do-machines-learn>.
7. **Coursare.** What is deep learning? *Coursare*. [Online] [Dátum: 15. február 2025.] <https://www.coursera.org/articles/what-is-deep-learning>.
8. **Solutions, Symphony.** AI in aviation: How artificial intelligence is changing the airline industry. *Symphony Solutions*. [Online] [Dátum: 3. marec 2025.] <https://symphony-solutions.com/insights/ai-in-aviation>.
9. **EASA.** EASA Artificial Intelligence Roadmap 2.0 published. *EASA*. [Online] [Dátum: 3. marec 2025.] <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/news/easa-artificial-intelligence-roadmap-20-published>.
10. **SESAR.** How Useful Is Artificial Intelligence in Air Traffic Management? *SESAR*. [Online] [Dátum: 13. marec 2025.] <https://www.sesarju.eu/news/how-useful-artificial-intelligence-air-traffic-management>.
11. **S. Meijer.** An Overview of Avian Radar Developments-Past, Present and Future. *Researchgate*. [Online] [Dátum: 18. marec 2025.] https://www.researchgate.net/publication/252505181_An_Overview_of_Avian_Radar_Developments_-_Past_Present_and_Future.
12. **EASA.** Ako EASA zabezpečuje odolnosť letectva voči kybernetickým hrozbám. *EASA*. [Online] [Dátum: 22. marec 2025.] <https://www.easa.europa.eu/sk/light/topics/how-easa-ensures-aviation-resilient-against-cyber-threats>.
13. **COMMISSION, EUROPEAN.** Ethics Guidelines for Trustworthy AI. *Brusel: European Commission*. [Online] [Dátum: 25. marec 2025.] <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai>.
14. **komisia, Európska.** Regulačný rámec pre umelú inteligenciu . *Brusel: Európska komisia*. [Online] [Dátum: 28. marec 2025.] <https://digital-strategy.ec.europa.eu/sk/policies/regulatory-framework-ai>.
15. **Rademan, Rudi.** How Artificial Intelligence Will Shape Aviation Human Factors. *LinkedIn*. [Online] [Dátum: 2. apríl 2025.] <https://www.linkedin.com/pulse/how-artificial-intelligence-shape-aviation-human-factors-rudi-rademan>.
16. **Jeffrey Cuskey.** Human-AI Teams in Aviation: Considerations from Human Factors. *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*. [Online] [Dátum: 2. apríl 2025.] <https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2046&context=jaaer>.
17. **Harald MULLER.** The Human Dimension in Tomorrow's Aviation System - A White Paper. *Researchgate*. [Online] [Dátum: 10. apríl 2025.] https://www.researchgate.net/publication/366290340_The_Human_Dimension_in_Tomorrow's_Aviation_System_-_A_White_Paper.



VYTVÁRANIE CVIČENÍ V PROSTREDÍ ESCAPE LIGHT SIMULÁTORA ATC

Adam Štulrajter
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Benedikt Badánik
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This bachelor thesis will deal with a simple exercise for the needs of air traffic controller training in the environment of the Escape Light simulator. The aim of the thesis is to create an exercise for the needs of the Department of Air Transport, which aims to familiarize air traffic controllers in training with the theoretical and practical skills of air traffic control in the airspace of the Žilina Airport, and students of the Department of Air Transport to support their practical skills. The thesis also describes the current state of creating of exercises and training of air traffic controllers in Slovakia. The practical part of the thesis includes the creation of an exercise, which includes both standard and emergency situations. The exercise is designed with regard to the local specifics and airspace procedures so that the candidate in training becomes perfectly familiar with the airspace and procedures. This exercise will contribute to improving the quality of air traffic controller training for Žilina Airport.

Keywords

Air traffic controller, exercise, simulator

1. Úvod

Vytváranie cvičení pre simulátory ATC je neoddeliteľná súčasť efektívneho výcviku riadiacich letovej prevádzky. Vytváranie cvičení je komplexný proces, ktorý vyžaduje vysokú odbornosť aby čo najlepšie pripravil adeptov na povolanie riadiaceho letovej prevádzky. Vyžaduje si súčinnosť viacerých aspektov tak, aby sa vytvorené cvičenia čo najviac priblížili reálnym situáciám z praxe a prispeli tak k efektívnemu výcviku.

Cvičenia na simulátore riadenia letovej prevádzky (ATC) pre letisko v Žiline sú nevyhnutnou súčasťou prípravy riadiacich letovej prevádzky na zvládanie reálnych situácií v prevádzke. Letisko v Žiline, hoci regionálne, môže čeliť rôznorodým prevádzkovým scenárom – od všeobecného letectva, výcvikových letov po prípadné súkromné lety, alebo cargo lety, ktoré sa zatiaľ vyskytujú nie príliš často, ale dlhodobý rozvoj regiónu v budúcnosti môže prispieť aj k rozvoju letiska a prípadným regionálnym linkám pre cestujúcich. Letisko vo veľkej miere využíva letecké výcvikové a vzdelávacie centrum Žilinskej univerzity na výcvik študentov v programe profesionálny pilot. Nie je však vylúčené že letisko z času na čas využije súkromný prevádzkovateľ na privátnu prepravu a aj to, že rozvoj regiónu môže prispieť k zavedeniu pravidelného leteckého spojenia. Simulátor umožňuje riadiacim precvičiť nielen štandardné operácie, ako sú prílety a odlety, ale aj zvládanie neočakávaných situácií, napríklad zmeny počasia, technické problémy lietadiel alebo krízové situácie. Pravidelné cvičenia na simulátore pomáhajú zlepšiť komunikáciu medzi riadiacimi a pilotmi, zvyšujú ich istotu pri rozhodovaní a zároveň prispievajú k celkovej bezpečnosti a efektívnosti letiskových operácií.

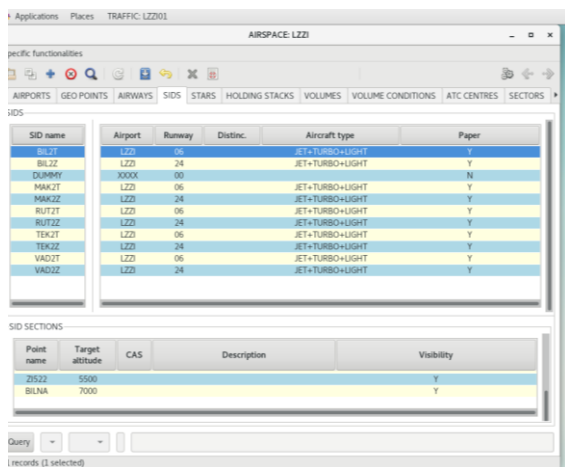
2. Súčasný stav

Vytváranie cvičení pre potreby výcviku riadiacich letovej prevádzky má na starosti Výcvikové centrum Letových prevádzkových služieb Slovenskej republiky (LPS SR), konkrétne personál výcvikového centra LPS. Pri vytváraní cvičení sa zohľadňujú rôzne aspekty ako napríklad:

- Konkrétny vzdušný priestor a jeho špecifiká a tak isto špecifiká jednotlivých letísk
- Typy lietadiel a volacie znaky, s ktorými sa riadiaci môže v danom priestore stretnúť
- Primeraná záťaž počas cvičenia
- Konkrétny zámer cvičenia (núdza, záťažové cvičenie, základné prvotné cvičenia pre nových adeptov,)

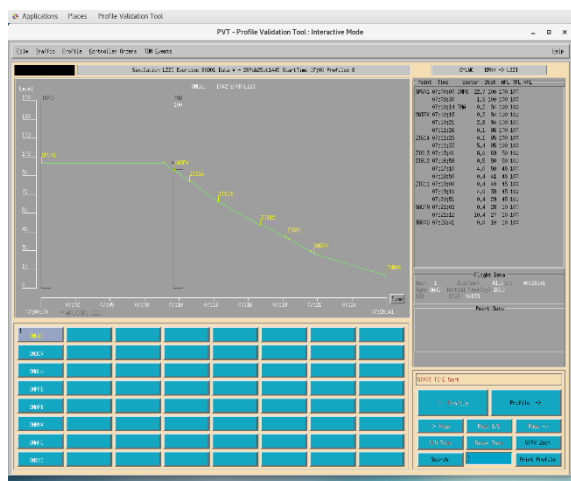
Pri vytváraní cvičení spolupracujú rôzne strany a to z toho dôvodu, aby každá strana do cvičenia priniesla užitočné informácie a vedela efektívne zostaviť konkrétne cvičenie.

Hlavnú úlohu pri tvorbe cvičení zohráva riadiaci-inštruktor, ktorý poznatkami z praxe do cvičenia prinesie rôzne informácie tak, aby cvičenie bolo efektívne vytvorené napríklad pre začiatočníkov vo výcviku aj riadiacich z praxe, ktorí si pravidelnými cvičeniami musia udržiavať odbornú spôsobilosť. Ďalej sú to informácie ako miestne špecifiká a pravidlá pre daný vzdušný priestor alebo letisko, určenie stupňa záťaže cvičenia tak aby bola frekvencia prevádzky v cvičení rovnomerne rozdelená do časového rozsahu cvičenia a v neposlednom rade situácie, ktoré majú riadiaceho preveriť pri zvládaní núdze a neštandardnej situácie.[1]



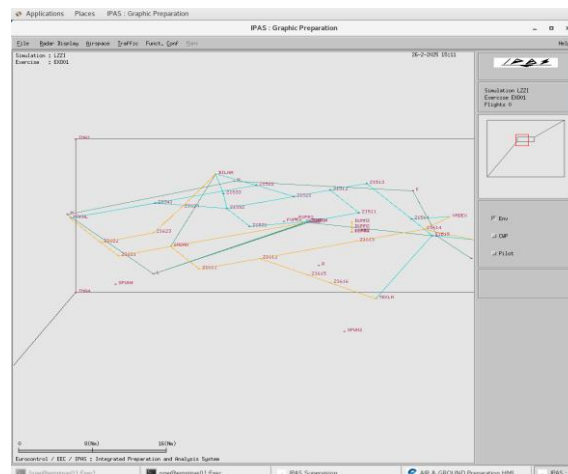
Obrázok 3. Odletové cesty SID pre potreby cvičenia

Na overenie vertikálneho profilu letovej cesty sa používa nástroj Profile validation tool(PVT), ktorý zobrazí vertikálny profil danej letovej cesty. Umožňuje zobrazíť jednotlivé body letovej cesty, výšku na jednotlivých bodoch a na základe cestovnej rýchlosti lietadla aj čas, v ktorom sa lietadlo bude nachádzať na jednotlivých bodoch.[4]



Obrázok 4. Nástroj PVT

Na priebežné zobrazenie prostredia simulátora slúži nástroj Air traffic visualization (ART VISU), ktorý zobrazí vzdušný priestor a všetky dôležité prvky simulácie a slúži na kontrolu, či je prostredie simulácie vytvorené správne. Jednotlivé prvky sú od seba odlišené, čo prispieva ku zlepšenému situačnému povedomiu pri tvorbe cvičenia.[4]



Obrázok 5. Nástroj ART VISU

Podobná funkcia ako ART VISU je aj funkcia ECHOES, ktorá už zobrazí okrem zemepisných bodov aj konkrétne vytýčené hranice vzdušného priestoru. Pre potreby vytvárania cvičenia bola funkcia ECHOES využívaná hlavne na kontrolu hraníc priestorov TMA a CTR.[4]

3. Návrh cvičenia pre potreby KLD

Pri navrhovaní cvičenia pre potreby Katedry leteckej dopravy boli brané do úvahy rôzne aspekty, ktoré by mohli ovplyvniť povahu daného cvičenia. Medzi tieto aspekty patrí napríklad špecifická prevádzka, ktorá sa na letisku vyskytuje a teda cvičenie primárne obsahuje lietadlá patriace Žilinskej univerzite, a je zamerané na záťaž počas bežného výcvikového dňa. Táto skutočnosť má za cieľ riadiaceho naučiť správne sa rozhodovať a tým pádom prispieť k plynulému a hlavne bezpečnému toku prevádzky.

Ako ďalší aspekt je aj kombinácia letov VFR a IFR, ktorá sa tiež vyskytuje na letisku v Žiline. Tento aspekt si od riadiaceho vyžaduje presné postupy riadenia a zaistenia bezpečných rozstupov od oboch druhov prevádzky. Vzdušný priestor letiska Žilina je priestor triedy D a teda platia tieto pravidlá:

- Letom IFR sa zabezpečuje rozstup len od letov IFR, a informácie o letoch VFR
- Lety VFR dostávajú informácie o letoch IFR a VFR ale nedostávajú inštrukcie na rozstup.
- Všetky lietadlá v priestore sú predmetom letového povolenia.

[6]

Ako ďalší dôležitý aspekt pri vytváraní cvičenia je skutočnosť, že potenciál rozvoja letiska Žilina prispeje k inštalácii sekundárneho prehľadového radaru na letisku. To znamená prechod z procedurálneho riadenia na prehľadové. Cvičenie je koncipované tak, aby zahrnilo využitie radaru pri riadení

prevádzky a pripravilo tak riadiaceho na reálnu situáciu, kedy bude s týmto radarom pracovať.

V neposlednom rade je treba myslieť aj na cieľovú skupinu, ktorej je cvičenie určené. Cvičenie je určené pre riadiacich letovej prevádzky na letisku v Žiline, aby sa vedeli oboznámiť s priestorom letiska a miestnymi postupmi a pripravili sa na reálne situácie z prevádzky. Ako ďalšia cieľová skupina sú študenti katedry, ktorí môžu v rámci vyučovania odborných predmetov simulátor využiť na dokonalé prepojenie teórie a praxe.

3.1. Scenár cvičenia

Cvičenie vytvorené pre potreby KLD obsahuje rozmanitý scenár a simuluje bežný výcvikový deň na letisku v Žiline. Cvičenie obsahuje kombinovanú IFR aj VFR prevádzku a bežné situácie počas výcvikového dňa, spolu s núdzovou situáciou. Stupeň záťaže je nízky až stredný. Ďalej cvičenie obsahuje niekoľko dôležitých parametrov:

Prostredie : CTR a TMA letiska Žilina

Dátum a čas : 1.9.2024 07:00:00 miestneho času

METAR : METAR LZZI 010500Z 05003KT 9999 FEW040 12/03 Q1018 NOSIG=

Technické vybavenie riadiaceho : výnos z radarovej obrazovky sekundárneho radaru

Lietadlá:

- OM-ALA Piper PA34 Seneca
- OM-DCR Piper PA28 Turbo Arrow
- OM-LWC Diamond DA42 Twinstar
- OM-MNX Zlín Z142
- OM-PPD Diamond DA40 Star
- OM-AFB Cessna C152
- OM-SYI Let L-410 Turbolet

Čas	Lietadlo	Typ lietadla	Odlet/Prílet	Pravidlá letu	Zámer
07:00:00	OM-ALA	PA-34	LZZI-LZIB	IFR	Hlási pripravený na odlet
07:02:00	OM-AFB	C-152	LZZI-LZDB	VFR	Rolovanie späť po dráhe
07:04:00	OM-DCR	PA-28	LFPG-LZZI	IFR	TEKLA, pokračuje TEKLA3B a žiada ILS06

07:04:00	OM-MNX	Z-142	LZZI-LZZI	VFR	Žiada vstup do CTR a oblet po trase T-K-N-M-L
07:05:00	OM-AFB				Pripravený na dráhu 06
07:08:00	OM-LWC	DA-42	EPKK-LZZI	IFR	VADEX, pokračuje po VADEX 3B a žiada RNP06
07:10:00	CIA41	L-410	LZZI-LZTT	IFR	Rolovanie späť po dráhe 24 a vzlet, TEKLA 2Z
07:12:00	OM-PPD	DA-40	LZTN-LZTT	VFR	Vstup do CTR cez LIMA, následne LIMA-LZZI-TANGO
07:16:00	OM-DCR				Established localizer 06
07:22:00	OM-LWC				Established final track 06
07:23:00	OM-MNX				MAYDAY, tlak oleja
07:23:30	OM-LWC				Zrušené povolenie na pristátie, holding SAGAN

Tabuľka 1.Scenár cvičenia

3.2. Účel cvičenia

Hlavný účel cvičenia na ATC simulátore je dokonale prepojiť teóriu a prax pri precvičovaní štandardných aj núdzových situácií. Bezpečné prostredie simulátora umožňuje prejdienie si všetkých situácií a následnom poučení sa z nedostatkov. Účelom cvičenia vytvoreného pre potreby KLD je oboznámiť riadiaceho letovej prevádzky v zázviku s priestorom a prevádzkou na letisku, ďalej so štandardnými a núdzovými situáciami. Samozrejme, simulátor nie je určený na oficiálny výcvik riadiacich pre žilinské letisko, avšak jeho vývoj do budúcnosti môže prispieť k tomu aby bol aspoň z malej časti jeho súčasťou. V neposlednom rade je treba myslieť aj na študentov KLD, pre ktorých sú cvičenia na ATC simulátore obohacujúcou skúsenosťou pri výuke odborných predmetov, hlavne predmet manažment letovej prevádzky, kedy si na simulátore môžu

vyskúšať vedomosti nadobudnuté pri výuke, a následne ich aj pretaviť do praxe ak by sa v budúcnosti rozhodli pre prácu riadiaceho letovej prevádzky.

4. Záver

Hlavný prínos vytvoreného cvičenia predstavuje obohatenie výučby na Katedre leteckej dopravy, najmä pri predmete manažment letovej prevádzky. Kvalitné prepojenie teórie a praxe pri výučbe predstavuje kľúčový prvok pri učení daného predmetu, čo pomáha študentom lepšie si predstaviť problematiku, ktorá je vysvetľovaná vyučujúcim. Cvičenie, aj keď má nižší stupeň náročnosti, bude slúžiť študentom katedry aj učiteľom, pre pochopenie štandardných a núdzových postupov pri riadení letovej prevádzky. Nie je vylúčené, že budúce generácie študentov na katedre sa budú chcieť podieľať na rozvoji simulátora, modelovaní rôznych vzdušných priestorov a vytváraní nových a komplexnejších cvičení aj s ohľadom na nové technológie v riadení letovej prevádzky. Táto skutočnosť by prispela ku kvalitnej výučbe na katedre a možnostiam spolupráce s Letovými prevádzkovými službami SR pri výcviku riadiacich letovej prevádzky pre letisko Žilina. Cvičenie však má aj rôzne obmedzenia, ktoré bolo treba pri vytváraní brať do úvahy. Simulátor Escape Light na katedre nedisponuje zobrazením vonkajšieho prostredia letiska a cvičenia určené pre vežu sú teda vykonávané za pomoci výnosu z radarovej obrazovky. Preto je potreba vytvárať cvičenia s prihliadnutím na túto skutočnosť, čo môže byť pre budúce generácie študentov výzva avšak pri bližšej spolupráci s EUROCONTROLOM by bolo možné predstaviť inováciu simulátora tak aby bol schopný simulovať aj prostredie letiska. V konečnom dôsledku je vytváranie cvičení na simulátore ATC obohacujúca možnosť pre Katedru leteckej dopravy na skvalitnenie výučby a bližšej spolupráce s podnikmi pôsobiacimi v leteckom priemysle.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 54ŽU-4/2025 "Možnosti využitia umelej inteligencie v študijnom programe letecká doprava pri výučbe pilotov a technikov údržby. (SmartSkyEdu)"

Referencie

[1] Inštruktor výcvikového centra LPS, Osobná komunikácia [4.4. 2025]

[2] EPICOS, ATC Simulators [online], Dostupné na : https://www.epicos.com/sites/default/files/atc_simulator.pdf [citované dňa 18.4.2025]

[3] ADACEL, MaxSim Air traffic control simulation training [online], Dostupné na : <https://www.adacel.com/maxsim-air-traffic-control-simulation-training> [citované dňa 18.4.2025]

[4] BOUCHAUDON P. EUROCONTROL technik simulátora Escape a Escape Light, Osobná komunikácia [12.3.2025]

[5] EUROCONTROL, New version of ESCAPE ATC simulator will facilitate academic research worldwide [online], Dostupné na : <https://www.eurocontrol.int/news/new-version-escape-atc-simulator-will-facilitate-academic-research-worldwide> [citované dňa 18.4.2025]

[6] SKYBRARY, Classification of airspace [online], Dostupné na : <https://skybrary.aero/articles/classification-airspace> [citované dňa 18.4.2025]



ANALÝZA VYBRANÝCH METÓD ZISŤOVANIA PRÍČIN NEHÔD V LETECKEJ DOPRAVE

Arijon Torozi
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Matúš Materna
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The bachelor thesis focuses on the analysis of selected methods for determining the causes of aircraft accidents with the aim of providing a comprehensive overview. The introduction emphasizes the importance of safety in aviation, defines key concepts and categorizes hazards. Subsequently, safety strategies and accident classifications are presented, highlighting significant historical events. The core of the work consists of an analysis of traditional (flight recorders analysis, wreckage analysis, witness testimonies) and analytical methods (qualitative, quantitative, semi-quantitative), with a particular focus on methods for detecting human failures (HFACS) and accident structure (Reason's and Shell model). The conclusion evaluates and compares the analyzed methods in terms of their strengths and weaknesses and their suitability for various accidents. The application of the methods is illustrated with selected historical accidents. The results confirm that a combination of different methods is necessary for effective investigation. The thesis highlights the importance of traditional methods for data acquisition and analytical methods for identifying deeper causes. The aim of the thesis is fulfilled by providing an overview and analysis of the methods, which contributes to a better understanding of aircraft accident investigation.

Keywords

Aviation safety, accidents, analysis of investigation methods, human factor, aircraft accident cause investigation

1. Úvod

Letecká doprava patrí dnes k základným pilierom globálnej mobility a hospodárskeho rozvoja. S rastúcim počtom letov a prepravovaných pasažierov sa prirodzene zvyšuje aj význam bezpečnosti v tomto odvetví. Napriek vysokým štandardom a prísny reguláciám sa však letecké nehody stále vyskytujú a predstavujú závažné ekonomické i spoločenské dopady, najmä v prípade tragických strát na životoch. Každá takáto udalosť preto zdôrazňuje potrebu dôkladného vyšetrovania a analýzy, ktorá umožní predchádzať podobným incidentom v budúcnosti.

Zisťovanie príčin leteckých nehôd je komplexný proces, v ktorom sa uplatňuje široké spektrum metodologických prístupov. Tento článok sa venuje analýze vybraných tradičných a analytických metód, pričom osobitná pozornosť je venovaná technikám na identifikáciu ľudských zlyhaní a analýze štruktúry nehôd. Vzhľadom na zložitosť moderných leteckých systémov a dynamický rozvoj odvetvia je dôležité neustále zdokonaľovať vyšetrovanie nehôd a hľadať nové, účinnejšie prístupy.

Článok prináša prehľad tradičných postupov a predstavujú sa tiež analytické metódy ktoré umožňujú systematickejšiu a hlbšiu identifikáciu príčin. Vyhradená je kapitola venovaná systému HFACS, ktorý sa špecializuje na analýzu ľudských faktorov, a teoretickým modelom, ktoré pomáhajú lepšie pochopiť dynamiku nehôd.

Cieľom článku je poskytnúť komplexný pohľad na existujúce metodiky vyšetrovania, poukázať na ich silné a slabé stránky a priblížiť ich aplikáciu v praxi prostredníctvom historických prípadov. Výsledky potvrdzujú, že efektívne vyšetrovanie si

vyžaduje kombináciu viacerých prístupov, ktoré spoločne prispievajú k budovaniu vyššej úrovne bezpečnosti v letectve.

2. Bezpečnosť v letectve

Letecká doprava je dnes neoddeliteľne spätá s pojmom bezpečnosť. Jej rozvoj by nebol možný bez prísnych pravidiel a medzinárodnej spolupráce, ktorú koordinuje organizácia ICAO. Bezpečnosť v letectve znamená minimalizovanie rizík na prijateľnú úroveň prostredníctvom riadenia nebezpečenstiev, hoci úplné odstránenie všetkých rizík nie je možné kvôli ľudským a technickým faktorom.

Presné vymedzenie základných pojmov, ako sú nebezpečenstvo, riziko a následok, je kľúčové pre správne fungovanie systému riadenia bezpečnosti v letectve. Nebezpečenstvo predstavuje potenciálny zdroj škôd, riziko vyjadruje pravdepodobnosť a závažnosť jeho dôsledkov a následok opisuje výsledok nebezpečnej udalosti. Efektívne riadenie bezpečnosti vyžaduje nielen správnu definíciu, ale aj dôkladnú identifikáciu hrozieb, zavedenie kontrolných opatrení a využívanie moderných softvérových nástrojov. Nesprávne nastavenie týchto procesov zvyšuje riziko vzniku nehôd.

2.1. Identifikácia a rozčlenenie nebezpečenstiev

V leteckej doprave je kľúčové včasné identifikovanie nebezpečenstiev na prevenciu incidentov a nehôd. Na tento účel sa používajú metódy ako analýza nebezpečenstiev, anonymné hlásenia, audity a monitoring prevádzkových dát. Nebezpečenstvá v letectve sa delia na štyri hlavné kategórie: environmentálne (počasie, geofyzikálne javy, zdravotné hrozby), technické (zlyhania komponentov lietadiel, infraštruktúry,

ergonomické problémy), organizačné (ekonomické tlaky, prevádzkové politiky, materiálne zabezpečenie) a ľudské (zdravotné problémy, stres, únava, kognitívne zlyhania). Efektívne riadenie týchto nebezpečenstiev je nevyhnutné pre zabezpečenie bezpečnej leteckej prevádzky.

2.2. Bezpečnosť z pohľadu organizačnej kultúry

Pre správne fungovanie systému riadenia bezpečnosti je mimoriadne dôležitá bezpečnostná kultúra, ktorá zahŕňa hodnoty, presvedčenia a postoje zamestnancov voči bezpečnosti. Tento faktor ovplyvňuje prístup k incidentom a ich hláseniu. Existujú dve hlavné kultúry v organizáciách: Blame Culture (kultúra obviňovania) a Just Culture (spravodlivá kultúra).

Blame Culture je charakterizovaná obviňovaním jednotlivcov za chyby, čo vedie k zatajovaniu incidentov, neefektívnej analýze príčin nehôd a pasivite zamestnancov, ktorí sa boja hlásiť problémy zo strachu pred trestami.

Just Culture podporuje otvorenú komunikáciu o chybách a rizikách, motivuje zamestnancov k nahlasovaniu incidentov bez obáv z negatívnych dôsledkov a zameriava sa na analýzu príčin nehôd s cieľom predchádzať ich vzniku a neustále zlepšovať bezpečnostné procesy.

Tieto kultúry sa líšia v prístupe k problémom, pričom spravodlivá kultúra je efektívnejšia v zvyšovaní bezpečnosti a motivovaní zamestnancov.

2.3. Bezpečnosť z technicko-prevádzkového pohľadu

Významný vývoj v bezpečnosti leteckej dopravy sa rozdelil do troch hlavných etáp: technická éra, ľudská éra a organizačná éra, pričom každá z nich sa zameriavala na iné aspekty bezpečnosti.

Technická éra (20. - 60. roky 20. storočia) sa sústredila na zabezpečenie spoľahlivosti lietadiel a ich systémov, čo viedlo k inžinierskym inováciám. Dôraz bol kladený na robustnejšie konštrukcie a účinnejšie motory, čo prispelo k zníženiu nehôd.

Ľudská éra (70. - 80. roky 20. storočia) sa začala sústrediť na interakciu človeka a stroja. Aj napriek technologickým pokrokom bol stále ľudský faktor hlavnou príčinou nehôd. Postupne sa začala venovať pozornosť aj faktorom ovplyvňujúcich správanie zamestnancov, čo viedlo k pokroku v tejto oblasti v deväťdesiatych rokoch.

Organizačná éra (od 90. rokov po súčasnosť) sa zameriavala na komplexnejšie skúmanie bezpečnosti, vrátane organizačnej kultúry. Zavedenie konceptu „organizačnej nehody“ a modernizácia vyšetrovania incidentov priniesli proaktívny prístup, ktorý zahŕňal zber a analýzu údajov, identifikáciu rizík a prevenciu, čo sa stalo základom moderného riadenia bezpečnosti.

2.4. Stratégie používané v bezpečnostnom manažmente

Stratégie riadenia rizík v leteckej doprave sú súčasťou bezpečnostného manažmentu a rozdeľujú sa do troch hlavných prístupov, ktoré sa zameriavajú na rôzne fázy bezpečnostného zlyhania: minulý, súčasný a budúci.

Reaktívna stratégia sa zameriava na riešenie incidentov po ich vzniku. Jej cieľom je minimalizovať škody, rýchlo reagovať na nežiadúce účinky a zlepšiť rozhodovacie procesy na základe zozbieraných údajov.

Proaktívna stratégia sa sústreďuje na prevenciu nehôd a incidentov. Vyžaduje analýzu bezpečnostných údajov, identifikáciu nebezpečenstiev pred ich výskytom a monitorovanie vstupných faktorov. Cieľom je predísť problémom ešte pred ich vznikom.

Prediktívna stratégia využíva historické a štatistické údaje na predpovedanie budúcich rizík. Pomáha identifikovať hrozby v hypotetických scenároch, predvídať potrebu nových bezpečnostných opatrení a predikovať potenciálne riziká, čím poskytuje rámec pre budúci vývoj bezpečnostných opatrení.

2.5. Klasifikácia nehôd a incidentov

Klasifikácia nehôd a incidentov v leteckej doprave je dôležitá pre zabezpečenie bezpečnosti a efektívne vyšetrovanie. Slovenská legislatíva, konkrétne Letecký zákon č. 143/1998 Z.z., stanovuje kritériá pre rozlíšenie pojmov ako nehoda, incident a vážny incident.

Letecká nehoda zahŕňa akúkoľvek udalosť súvisiacu s prevádzkou lietadla, ktorá vedie k zraneniu, úmrtiu alebo závažnému poškodeniu lietadla, ktoré ohrozuje jeho letovú spôsobilosť. Zohľadňuje sa aj situácia, keď je lietadlo úplne zničené alebo nenájdete jeho miesto.

Incident je udalosť súvisiaca s prevádzkou lietadla, ktorá nevedie k vážnym následkom, ale môže mať vplyv na bezpečnostnú prevádzku. Tieto udalosti môžu zahŕňať technické závady alebo neštandardné situácie počas letu a vyžadujú evidenciu a analýzu.

Vážny incident označuje situáciu, ktorá naznačuje vysokú pravdepodobnosť nehody, ako napríklad kritická porucha počas letu, ktorá bola úspešne zvládnutá, ale mohla viesť k tragédii za iných okolností. Hlavný rozdiel medzi vážnym incidentom a nehodou spočíva v závažnosti dôsledkov.

2.6. Výzvy v oblasti leteckej bezpečnosti a ich vplyv na regulácie

Rastúci objem leteckej dopravy a technologické inovácie prinášajú nové výzvy, ako preťaženie letového priestoru, ktoré zvyšuje riziko kolízií a oneskorení. Efektívna organizácia prevádzky letísk je nevyhnutná na zvládnutie väčšieho počtu letov. Kybernetické útoky sa stávajú významným rizikom, a zároveň je potrebné implementovať ekologické opatrenia na dodržiavanie emisných a hlukových noriem. Tieto výzvy si vyžadujú neustálu adaptáciu technológií a regulácií v letectve.

Bezpečnostné opatrenia a regulácie boli zásadne ovplyvnené tragickými nehodami v histórii civilného letectva. Hlavným cieľom po týchto udalostiach bolo preskúmanie dôvodov vzniku nehody, prijatie nových štandardov a v neposlednom rade, implementovanie takých opatrení, ktoré dokážu čo najefektívnejšie predchádzať podobným incidentom v budúcnosti.

Dôkladné vyšetrovanie nehôd, často s využitím modelov analýzy ľudských faktorov, pomáha odhaliť nielen bezprostredné príčiny, ale aj hlbšie organizačné a systémové nedostatky, ktoré k nim prispeli. Tieto poznatky sú následne kľúčové pre prijímanie cieľených opatrení na všetkých úrovniach leteckej prevádzky.

Tragická zrážka dvoch Boeingov 747 v Tenerife v roku 1977 ukázala, ako vyšetrovanie nehody formuje bezpečnosť letectva. Zistilo sa, že primárnou príčinou bola nejednoznačná komunikácia medzi pilotom KLM a riadiacou vežou, ku ktorej prispeli aj hmla a preťaženosť letiska. Táto katastrofa viedla k zavedeniu štandardizovaných fráz v rádiovkej komunikácii a k posilneniu výcviku posádok v Crew Resource Managemente (CRM), zameraného na lepšiu komunikáciu a tímovú prácu v kokpíte. Prípád Tenerife je príkladom toho, ako analýza príčin nehody vedie k dôležitým bezpečnostným zmenám s globálnym dosahom.

Tabuľka 1 Sumarizovaný popis nehody z roku 1977 na základe štyroch kategórií

Kategória	Stručný popis
Hlavná príčina	Nesprávna interpretácia rádiového povolenia kapitánom KLM
Vedľajšie faktory	Hustá hmla a preťaženie letiska po bombovom útoku na inom letisku
Priebeh udalosti	KLM začalo vzlet keď bolo Pan Am ešte na dráhe, následne došlo k zrážke
Dôsledky	Zavedenie štandardizovanej komunikácie a výcviku CRM pre posádky

Zdroj: Vlastné spracovanie

Podobne aj nehoda letu TWA 800 v roku 1996 poukázala na kritické zraniteľnosti. Vyšetrovanie odhalilo, že explóziu palivovej nádrže pravdepodobne spôsobil elektrický skrat. Táto tragédia viedla k sprísneniu predpisov na ochranu palivových nádrží pred výbuchom a k zlepšeniu bezpečnosti elektrických systémov v lietadlách, vrátane opatrení na inertizáciu nádrží a lepšiu izoláciu káblov. Nehoda letu TWA 800 demonštruje, ako analýza technických príčin vedie k dôležitým konštrukčným a regulačným zmenám pre vyššiu bezpečnosť.

Tabuľka 2 Sumarizovaný popis nehody z roku 1996 na základe štyroch kategórií

Kategória	Stručný popis
Hlavná príčina	Výbuch palivovej nádrže v dôsledku elektrického skratu
Vedľajšie faktory	Iskrenie v systéme vedenia paliva a prítomnosť horľavej výbušnej zmesi
Priebeh udalosti	Skrat zapálil výpary v palivovej nádrži a nasledovala deštruktívna explózia
Dôsledky	Modernizácia palivových a elektrických systémov, prísnejšie predpisy a zlepšenie výcviku personálu

Zdroj: Vlastné spracovanie

Napokon, tragédia letu Air France 447 v roku 2009 nad Atlantickým oceánom bola zapríčinená dočasným zlyhaním Pitotových trubíc vplyvom námrazy. Táto porucha senzorov viedla k strate presných údajov o rýchlosti, čo následne spôsobilo dezorientáciu pilotov a ich nesprávne riadiace zásahy, ktoré vyústili do pádu lietadla. Výsledkom bolo vylepšenie konštrukcie a vyhrievania Pitotových trubíc, intenzívnejšie školenia pilotov zamerané na manuálne riadenie lietadla pri strate letových údajov a na efektívnu tímovú prácu v krízových situáciách. Táto nehoda opätovne potvrdila, aké kritické je zabezpečiť spoľahlivosť kľúčových prístrojov a neustále zlepšovať pripravenosť posádok na zvládanie nepredvídateľných udalostí.

Tabuľka 3 Sumarizovaný popis nehody z roku 2009 na základe štyroch kategórií

Kategória	Stručný popis
Hlavná príčina	Zlyhanie Pitotovej trubice spôsobilo zobrazenie chybného údajov o rýchlosti
Vedľajšie faktory	Námraza, nedostatok údajov a nevhodné reakcie posádky
Priebeh udalosti	Po zlyhaní Pitotovej trubice nastala dezorientácia posádky, čo viedlo k chybám pri riadení letu
Dôsledky	Modernizácia senzorov, zlepšenie výcviku, pokročilé monitorovanie letu a komunikácie

Zdroj: Vlastné spracovanie

3. Metodika a metódy skúmania

Metodika spracovania sa opiera o tri navzájom prepojené fázy. V úvodnej časti boli zhromažďované odborné články, správy z vyšetrovania leteckých nehôd a relevantná literatúra. Tieto informácie pochádzali z internetových aj knižných zdrojov a tvorili základ pre vytvorenie komplexného prehľadu problematiky.

V druhej fáze sa postupne plnili čiastkové ciele vedúce k naplneniu hlavného cieľa práce. Kľúčovým krokom bolo definovanie základných pojmov, ktoré umožnili presné uchopenie témy. Pri analýze rôznych vyšetrovacích metód sa uplatňovala predovšetkým metóda analýzy, kde jednotlivé prístupy boli systematicky rozdelené do skupín podľa ich využitia v rôznych fázach vyšetrovania nehody.

Záverečná fáza metodiky sa sústredila na syntézu získaných poznatkov. Spracované informácie boli sumarizované a vzájomne prepojené s cieľom poskytnúť ucelený pohľad na rôzne metodické prístupy pri zisťovaní príčin leteckých nehôd.

4. Analýza vybraných metód zisťovania príčin nehôd

Letecké nehody a ich vyšetrovanie predstavujú komplexný proces, pri ktorom sú využívané rôzne metódy a postupy na identifikáciu príčin a faktorov vedúcich k incidentom. Vyšetrovanie neslúži len na určenie viny, ale predovšetkým je využívané ako nástroj prevencie podobných alebo rovnakých udalostí v budúcnosti. Využívaná je široká škála vyšetrovacích metód, od tradičných prístupov, ako je fyzická analýza trosiek

lietadiel a analýza čiernych skriniek, až po moderné analytické postupy zahŕňajúce analýzu ľudských faktorov, umelú inteligenciu a počítačové simulácie. Z uvedených dôvodov bolo prístupné k vytvoreniu vlastného rozdelenia vyšetrovacích metód, k ich systematickému usporiadaniu do podkapitol a k ich podrobnému spracovaniu.

4.1. Tradičné metódy vyšetrovania

Analýza čiernych skriniek, konkrétne záznamníka letových (FDR) a zvukových údajov (CVR), je kľúčovou metódou pri vyšetrovaní leteckých nehôd. FDR zaznamenáva technické parametre letu, ako rýchlosť, výšku a stav letových systémov, pričom moderné zariadenia zaznamenávajú viac než 1000 parametrov. Tieto údaje sa používajú na rekonštrukciu letu a analýzu technických anomálií. CVR zaznamenáva zvuky v kokpite, vrátane komunikácie medzi posádkou a riadiacou vežou, ako aj okolité zvuky, ktoré môžu byť dôležité pri identifikácii problémov počas letu. Po nehode sú čierne skrinky lokalizované a prepravované do špecializovaných laboratórií, kde sa vykonáva dekodovanie a analýza údajov.

Fyzická analýza trosiek je ďalšou kľúčovou metódou vyšetrovania, ktorá zahŕňa dôkladné skúmanie vraku lietadla a jeho komponentov. Trosky sú lokalizované, zdokumentované a prevezené do laboratórií, kde sa analyzujú materiály a štrukturálne poškodenia. Pomocou technológií, ako metalografické a fraktografické analýzy, sa identifikujú príčiny poškodení a zlyhaní. Vyšetrovatelia skúmajú aj stopy po vonkajších faktoroch, ako výbuchy, zrážky s vtákmi alebo extrémne poveternostné podmienky, ktoré mohli prispieť k nehode.

Výpovede posádky a svedkov sú neoceniteľné pri rekonštrukcii nehody. Svedectvá poskytujú informácie o priebehu udalosti, správaní posádky, technickom stave lietadla a vonkajších faktoroch. Pri získavaní výpovedí sa využívajú rôzne metódy, ako individuálne a skupinové rozhovory alebo analýza neverbálnej komunikácie. Výpovede svedkov dopĺňajú technické dôkazy a pomáhajú odhaliť detaily, ktoré iné metódy nemusia zachytiť, ako nezvyčajné vibrácie alebo zápach v kabíne.

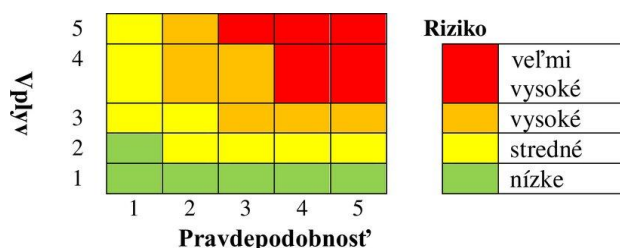
4.2. Analytické metódy vyšetrovania

Kvalitatívne metódy sa zameriavajú na logické hodnotenie pozorovaných javov pri analýze leteckých nehôd, bez potreby presných numerických údajov. Umožňujú identifikovať technické, organizačné alebo ľudské nedostatky. Tieto metódy sú vhodné, keď nie sú k dispozícii dostatočné dáta alebo keď je potrebné analyzovať vplyv ľudského faktora. **Kontrolný zoznam** je systematický nástroj, ktorý zabezpečuje úplnosť informácií pri vyšetrovaní nehôd a minimalizuje riziko vynechania kľúčových faktov. Existujú dva typy: všeobecný, navrhnutý medzinárodnými organizáciami, a špecifický, vytvorený konkrétnym prevádzkovateľom. Pokrýva fázy pred, počas a po nehode.

Kvantitatívne metódy využívajú numerické údaje na vyhodnocovanie rizika, zlyhaní a systémových komponentov. Sú vhodné, keď sú k dispozícii presné dáta, ako napríklad záznamy letových zapisovačov. **Analýza stromu porúch** identifikuje kombinácie udalostí, ktoré vedú k nežiaducemu výsledku.

Rozkladá hlavnú udalosť na menšie príčiny prepojené logickými bránami (AND, OR). Na základe pravdepodobností sa určuje celková pravdepodobnosť zlyhania.

Semi-kvantitatívne metódy kombinujú kvalitatívne a kvantitatívne prístupy, umožňujúce vyhodnotenie rizika bez potreby presných výpočtov. **Maticová metóda rizík** hodnotí riziko pomocou pravdepodobnosti výskytu a závažnosti dôsledkov, pričom výsledná úroveň rizika sa určuje pomocou matice. Výsledky sa následne vyhodnocujú ako tolerovateľné, netolerovateľné alebo akceptovateľné riziko. Nasledujúci obrázok reprezentuje päťstupňovú, symetrickú maticu rizík s farebným označením, ku ktorému je priradené hodnotenie závažnosti konkrétnej farby.



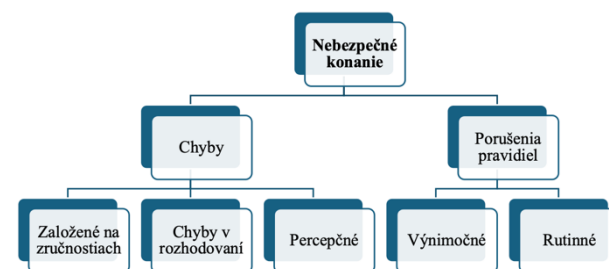
Obrázok 1 Symetrická matica rizík

Zdroj: [19]

4.3. Metódy zamerané na odhaľovanie ľudských zlyhaní

Ľudský faktor má v letectve kľúčovú úlohu, preto je dôležité venovať pozornosť metódam na odhaľovanie ľudských zlyhaní. Jednou z takýchto metód je HFACS (Human Factors Analysis and Classification System), vyvinutý Dr. Shappellom a Dr. Wiegmannom. Tento systém analyzuje základné príčiny nehôd a rozdeľuje ľudské chyby do štyroch úrovní.

Prvá úroveň zlyhania systému HFCAS sa zameriava na **nebezpečné konanie**, ktoré delíme na dve hlavné kategórie: chyby a porušenia pravidiel. Chyby sú neúmyselné konania, ktoré môžeme rozdeliť na tri druhy: chyby založené na zručnostiach (zlyhania pri rutinných úlohách), chyby v rozhodovaní (nesprávne alebo neefektívne rozhodnutia) a percepčné chyby (skreslené vyhodnotenie situácie). Porušenia pravidiel sa delia na rutinné, ktoré sú tolerované a pravidelne sa opakujú, a výnimočné, ktoré sú závažné, ojedinelé a v organizáciách netolerované. Pre lepšie pochopenie štruktúry nebezpečného konania, nasleduje Obrázok 2, ktorý vizuálne reprezentuje jeho kľúčové úrovne.



Obrázok 2 Štruktúra nebezpečného konania systému HFCAS

Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Materna (2024)

Druhá úroveň sa zameriava na **predpoklady, ktoré môžu viesť k nebezpečnému konaniu**. Tieto faktory môžu zahŕňať rôzne aspekty, ktoré ovplyvňujú schopnosť jednotlivca vykonávať úlohy bezpečne. Environmentálne podmienky, ako je fyzické a technologické prostredie, zohrávajú kľúčovú úlohu pri vytváraní podmienok pre bezpečnú prevádzku. Zlý stav pracovného prostredia, nedostatočne udržiavané technológie alebo nevhodné fyzické podmienky môžu zvyšovať riziko nehôd. Stav operátorov, ktorý zahŕňa duševný a fyziologický stav, tiež významne vplyva na ich schopnosť správne reagovať na vznikajúce situácie. Faktory ako únava, stres, fyzická vyčerpanosť alebo duševná nepohoda môžu spôsobiť, že operátor nezareaguje včas alebo správne. Personálne faktory, ako je riadenie a osobná pripravenosť, môžu tiež ovplyvniť rozhodovanie a vykonávanie úloh. Nedostatočné školenie, slabé riadenie alebo neadekvátna príprava na neštandardné situácie zvyšujú pravdepodobnosť, že sa operátor dopustí neúmyselnej chyby. Tieto predpoklady sa kombinujú a vytvárajú súbor rizík, ktoré treba identifikovať a eliminovať, aby sa znížilo nebezpečenstvo vzniku nehôd. Pre poskytnutie lepšieho prehľadu tejto štruktúry boli v nasledujúcom obrázku graficky spracované kľúčové faktory a predpoklady pre nebezpečné konanie.



Obrázok 3 Štruktúra predpokladov pre nebezpečné konanie systému HFACS

Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Materna (2024)

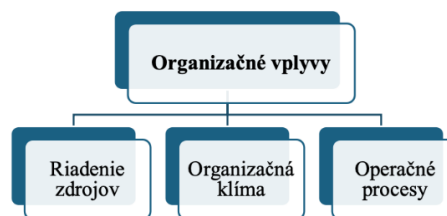
Tretia úroveň sa zaoberá **nezabezpečením adekvátneho dohľadu**, ktorý je dôležitým faktorom pri prevencii nebezpečných situácií a nehôd. Nedostatočný dohľad pri vykonávaní úloh môže vzniknúť, ak sa operátori alebo pracovníci nemajú dostatočne pod kontrolou, čo zvyšuje pravdepodobnosť chýb alebo nepozornosti. Nesprávne plánovanie operácií môže viesť k nevhodnému rozdeleniu úloh, nedostatočným prípravám alebo nevhodným postupom, ktoré môžu spôsobiť problémy počas vykonávania činností. Neskoré riešenie problémov je ďalším rizikovým faktorom, keď sa nevenuje dostatočná pozornosť včasnej identifikácii a náprave vznikajúcich problémov, čo môže viesť k eskalácii situácie do kritického bodu. Porušenie predpisov zo strany vedenia, ako aj slabý dohľad nad dodržiavaním interných smerníc a bezpečnostných štandardov, môže byť rozhodujúcim faktorom, ktorý umožní vznik nebezpečného konania a následné nehody. Takýto nedostatočný dohľad a nesprávne riadenie môžu podmieniť vznik systémových zlyhaní a spôsobovať nepredvídané následky, ktoré ohrozujú bezpečnosť celého systému. Pre ilustráciu úrovni, na ktorých môže dôjsť k nezabezpečeniu dohľadu v rámci systému HFACS, nasleduje grafické znázornenie tejto štruktúry.



Obrázok 4 Štruktúra nezabezpečenia dohľadu systému HFACS

Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Materna (2024)

Posledná úroveň sa zameriava na organizačné vplyvy, ktoré zahŕňajú riadenie zdrojov, organizačnú klímu a operačné procesy. Riadenie zdrojov sa týka efektívneho plánovania a rozdeľovania personálu a vybavenia. Organizačná klíma ovplyvňuje bezpečnostné normy a komunikáciu v rámci tímu. Operačné procesy sa týkajú správne navrhnutých procedúr, ktoré zabezpečujú bezpečnosť a efektívnosť. Tieto faktory sú kľúčové pre prevenciu zlyhaní. Nasledujúci obrázok organizačných vplyvov v systéme HFACS je použitý na zorientovanie sa, ako rôzne organizačné aspekty prispievajú k potenciálnym rizikám.



Obrázok 5 Štruktúra organizačných vplyvov systému HFACS

Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Materna (2024)

HFACS je využívaný nielen v leteectve, ale aj v iných odvetviach ako ťažobný priemysel, stavebníctvo alebo zdravotníctvo, kde pomáha identifikovať vzory zlyhaní a implementovať opatrenia na zlepšenie bezpečnosti a kultúry v organizáciách.

4.4. Vyšetrovacie metódy podľa typu príčin a ich štruktúry

Reasonov model predstavuje významný koncept na pochopenie faktorov vedúcich k ľudským zlyhaniam v leteectve. Rozdeľuje zlyhania do štyroch úrovní, ktoré môžu viesť k incidentu alebo nehode. Model je často označovaný ako „švajčiarsky syr“, pretože „otvory“ v jednotlivých úrovniach môžu umožniť preniknutie chyby. Vrstvy zahŕňajú aktívne zlyhania, latentné zlyhania, nebezpečné konanie a organizačné faktory. Latentné zlyhania sú považované za nebezpečnejšie, pretože sa v systéme nachádzajú neprejavene a môžu byť prehliadané počas vyšetrovania. Model zdôrazňuje potrebu včasného odhalenia rizikových faktorov a prevencie nehôd.

Model SHELL predstavuje nástroj na analýzu vzťahov medzi leteckými systémami a ľudským faktorom. Skladá sa z piatich zložiek: **software (S)** – pravidlá, predpisy a operačné manuály, **hardware (H)** – fyzické zariadenia, **environment (E)** – prevádzkové prostredie, **liveware (L)** – ľudský faktor a jeho interakcia s ostatnými zložkami. V strede modelu sa nachádza človek, ktorý je najzraniteľnejší článok systému, no nevyhnutný pre jeho fungovanie. Dôležitá je správna koordinácia medzi jednotlivými zložkami systému, ako aj prispôbenie

pracovného prostredia potrebám ľudí, aby sa znížila pravdepodobnosť chýb.

5. Výsledky

Cieľom bolo vytvoriť komplexný prehľad spôsobov zisťovania príčin leteckých nehôd. Článok sa delí na teoretickú a praktickú časť. Teoretická časť sa zaoberala bezpečnosťou v leteectve, vývojom regulácií a rôznymi druhmi nebezpečenstiev. Praktická časť sa sústredila na analýzu vybraných metód zisťovania príčin nehôd, ako sú analýza čiernych skriniek, fyzická analýza trosiek, výpovede posádky, kontrolné zoznamy, analýza stromu porúch, maticová metóda rizík, Reasonov model, HFACS model a SHELL model. V samostatnej kapitole boli zhodnotené jednotlivé metódy, ich výhody, obmedzenia, efektivita a aplikačný potenciál.

Pre správne zhodnotenie výsledkov bola najprv stručne popísaná metodika fungovania a význam vyšetrovania leteckých nehôd. Na základe vykonaných analýz o vybraných metódach, použitých v procese vyšetrovania, možno skonštatovať, že jednotlivé prístupy sa navzájom dopĺňajú, pričom špecifickosť nehôd ovplyvňuje efektivitu jednotlivých metód. Z tohto dôvodu nie je možné využitie iba jednej univerzálnej metódy, ale je potrebné zohľadniť viacero kritérií v závislosti od informácií, ktoré sa majú získať počas vyšetrovania

5.1. Komparácia metód

FDR (Flight Data Recorder) a CVR (Cockpit Voice Recorder) sú najpresnejšie nástroje vyšetrovania, ktoré zaznamenávajú parametre letu ako rýchlosť, výšku, výkon motorov a komunikáciu v kokpite. Ich analýza umožňuje rekonštruovať priebeh nehody s vysokou presnosťou. **Hlavnou výhodou** je vysoká miera objektivity a presnosti, čo umožňuje detailnú rekonštrukciu posledných minút pred nehodou. **Nevýhodou** je, že v prípade poškodenia dát môže byť analýza neúplná. Okrem toho, tieto záznamníky nemôžu zaznamenávať emocionálny stav posádky alebo vonkajšie javy, ktoré nie sú prítomné v senzoch lietadla.

Fyzická analýza trosiek lietadla pomáha identifikovať technické zlyhania, požiare, výbuchy a iné mechanické poškodenia pred nárazom. Kombinovaná s FDR a CVR poskytuje kľúčové informácie o príčine nehody. **Výhodou** tejto metódy je, že pomáha určiť miesto a spôsob zlyhania, ako aj detegovať možné sabotáže alebo nedostatky pri údržbe lietadla. Medzi **nevýhody** patrí vysoká časová a logistická náročnosť, ako aj náklady na analýzu. Interpretácia údajov môže byť navyše veľmi zložitá, najmä pri silne poškodených vrakoch lietadiel.

Výpovede posádky a svedkov prinášajú dôležité informácie o psychickom stave posádky a okolnostiach nehody, ktoré technické nástroje nezachytia. Tento prístup umožňuje získať subjektívne vnímanie situácie, čo pomáha identifikovať faktory ako stres, únava alebo chybné rozhodovanie. **Nevýhodou** je, že výpovede môžu byť nepresné alebo skreslené kvôli šoku alebo traume, čo znamená, že je potrebné postupovať citlivo a so skúseným vyšetrovateľom, aby sa minimalizovalo riziko skreslenia.

Kontrolný zoznam (Checklist) využíva vopred pripravený zoznam bodov, ktorý zabezpečuje logický a dôsledný priebeh vyšetrovania. Jednoduchá aplikácia checklistu pomáha zabezpečiť komplexné vyšetrovanie a znižuje riziko vynechania dôležitých faktorov počas vyšetrovania. **Nevýhodou** je, že účinnosť metódy závisí od kvality zoznamu a jeho schopnosti prispôbiť sa špecifickým potrebám vyšetrovania.

Analýza stromu porúch pomáha vizualizovať príčiny nehody a kvantifikovať pravdepodobnosť zlyhania systémov lietadla. **Výhodou** je, že poskytuje systematickú vizualizáciu komplexných príčin a umožňuje kvantifikovať pravdepodobnosť zlyhania, čo môže byť kľúčové pri určovaní príčin nehody. **Nevýhodou** tejto metódy je, že vyžaduje presné údaje o spoľahlivosti systémov, a príprava a spracovanie dát sú veľmi časovo a odbornícky náročné.

Maticová metóda rizík slúži na hodnotenie systémových slabín a návrh preventívnych opatrení. Umožňuje rýchle vyhodnotenie rizika s vizuálnou prehľadnosťou. Medzi hlavné **výhody** patrí rýchlosť a jednoduchosť vyhodnotenia rizík, ako aj vizuálna prehľadnosť, ktorá podporuje efektívne rozhodovanie, aj pri obmedzených údajoch. **Nevýhodou** je, že hodnotenie pravdepodobnosti a závažnosti môže byť subjektívne, čo vedie k zjednodušeniu komplexných interakcií medzi rizikami.

HFACS model analyzuje ľudské a organizačné chyby, umožňuje identifikovať širšie systémové príčiny. Podporuje navrhovanie preventívnych opatrení a zlepšovanie výcviku. Tento model poskytuje veľmi detailné informácie o ľudských chybách a podporuje tvorbu účinných preventívnych opatrení. **Nevýhodou** je, že vyžaduje veľké množstvo kvalitných dát a interdisciplinárny prístup, ktorý môže byť náročný na implementáciu.

Reasonov model identifikuje hlbšie príčiny zlyhaní, pričom zohľadňuje aktívne aj latentné chyby. Hlavnou **výhodou** je schopnosť identifikovať hlbšie príčiny zlyhaní a podporovať zlepšenie organizačných procesov. **Nevýhodou** je, že aplikácia modelu môže byť zložitá kvôli nedostatku údajov a môže poskytnúť statický pohľad na dynamické situácie.

SHELL model poskytuje komplexný pohľad na interakcie medzi človekom, technológiou, softvérom a prostredím, čím identifikuje prevádzkové a interpersonálne chyby. Poskytuje komplexný pohľad na ľudské faktory a prevádzkové prostredie, čo je užitočné pri navrhovaní bezpečnostných opatrení. **Nevýhodou** je, že môže mať nepostačujúcu mieru konkrétnosti pri identifikácii technických chýb, pričom kvalita vstupných údajov môže ovplyvniť výsledky analýzy.

Po zhodnotení výsledkov sa pristúpilo k spracovaniu jednotlivých metód do tabuľky, aby bola dosiahnutá väčšia prehľadnosť. Do tabuľky boli vložené 3 základné kritériá, vďaka ktorým bude čitateľovi umožnené jednoducho pochopiť oblasť využitia metódy, silné a slabé stránky.

Tabuľka 5 Komparácia analyzovaných metód na základe stanovených kritérií

Metóda	Silné stránky	Slabé stránky	Hlavná oblasť využitia
Analýza čiernych skriniek	Objektivita a presnosť	Nezachytáva vonkajšie faktory	Technická rekonštrukcia letu
Fyzická analýza trosiek	Technické príčiny a štrukturálne poruchy	Nedostatočne zachované dôkazy	Mechanické a konštrukčné zlyhania
Výpovede svedkov	Ľudské faktory a zmyslové podnety	Subjektivita, pamäťové skreslenie	Psychologické a vnemové faktory
Kontrolný zoznam	Systematickosť a komplexnosť	Závislosť od kvality zoznamu	Evidencia postupov
Analýza stromu porúch	Detailná analýza technických zlyhaní	Vstupné údaje, obmedzenia pri ľudských faktoroch	Technické a systémové zlyhania
Maticová metóda rizík	Rýchla orientácia v rizikách	Subjektívne odhady, nižšia presnosť	Hodnotenie rizík
HFCAS model	Presná klasifikácia ľudských chýb	Zložité triedenie a analýza	Analýza ľudských faktorov
Reasonov model	Systémové zlyhania a latentné chyby	Vyžaduje doplnkové dáta	Identifikácia nedostatkov
SHELL model	Komplexný pohľad na interakcie	Nízka kvantifikovateľnosť	Analýza interakcií v pracovnom prostredí

Zdroj: Vlastné spracovanie

5.2. Aplikácia metód na vybrané nehody

Aplikovaním týchto metód na konkrétne nehody sa chcelo poukázať na skutočnosť, ktorá bola už vyššie v tejto kapitole spomenutá, a to, že kombinácia viacerých metód je nevyhnutná pre dosiahnutie čo najdôveryhodnejšieho výsledku vyšetrovania. Pre určenie faktických príčin sú technické nástroje nenahraditeľným zdrojom informácií ale na druhej strane, pre porozumenie rozhodovacích procesov a systémových zlyhaní využívame modely ľudského faktora. V leteckých nehodách, ktoré sú popisované, budú identifikované použité vyšetrovacie metódy a následne, po vykonaní analýzy, na základe doposiaľ nadobudnutých teoretických poznatkov, bude vybraná jedna kľúčová metóda pre každú nehodu. Vyšetrovanie leteckých nehôd teda predstavuje dynamickú kombináciu analýzy dát, dôkazov, výpovedí a teoretických rámcov, ktorých cieľom je nielen nájsť príčinu nehody, ale aj predísť podobným incidentom v budúcnosti.

Nehoda na letisku v Tenerife, ktorá sa považuje za najznámejšiu a najtragickejšiu v histórii civilného letectva, vznikla v dôsledku zlej komunikácie medzi posádkou lietadla KLM, posádkou PanAm a riadením letovej prevádzky. Medzi použité vyšetrovacie metódy patrili výpovede svedkov a preživších, analýza FDR a CVR, Reasonov model zlyhania komunikačných kanálov a organizačného tlaku, HFCAS model na kategorizáciu chýb ľudského faktora a SHELL model, ktorý analyzoval interakciu pilotov s prostredím. Za kľúčovú metódu bola vybraná CVR analýza, ktorá v tomto prípade jednoznačne odhalila nedorozumenie medzi posádkami a letovou vežou.

Nehoda letu TWA 800, ktorá sa stala po explózii lietadla takmer okamžite po štarte, bola pôvodne považovaná za možný teroristický útok. Po vyšetrovaní sa však zistilo, že išlo o technickú poruchu, ktorá spôsobila výbuch palivovej nádrže v dôsledku iskry. Použité metódy pri vyšetrovaní zahŕňali fyzickú analýzu trosiek, FDR a CVR analýzu, laboratórne testovanie komponentov, analýzu stromu porúch a kontrolný zoznam na kontrolu správnosti údržby lietadla. Kľúčovou metódou bola fyzická analýza trosiek, ktorá umožnila odhaliť miesto a povahu explózie.

Nehoda letu Air France 447, ktorá sa stala pri zrútení lietadla do Atlantiku počas letu z Ria de Janeiro, bola spôsobená kombináciou ľudského pochybenia a technického zlyhania snímačov rýchlosti, konkrétne pitotových trubíc. Medzi použité vyšetrovacie metódy patrili FDR a CVR analýza (ktoré boli

nájdene až po dlhodobom hľadaní na dne oceánu), Reasonov model, SHELL model a HFCAS model. V tomto prípade nebolo možné vybrať len jednu kľúčovú metódu, pretože na vyhodnotenie nedostatočnej reakcie posádky na neštandardnú situáciu bolo potrebné kombinovať Reasonov model s CVR analýzou.

Tieto prípady ukazujú, že pre úspešné vyšetrovanie je nevyhnutná kombinácia rôznych metód, ktoré pomáhajú nielen pri identifikácii príčin, ale aj pri prevencii podobných incidentov.

6. Záver

Záver predloženej práce potvrdzuje, že efektívne zisťovanie príčin leteckých nehôd vyžaduje komplexný prístup, ktorý integruje rôznorodé metodologické nástroje. Analýza ukázala, že žiadna jednotlivá metóda nepostačuje na odhalenie všetkých aspektov komplexných udalostí. Kým tradičné metódy zostávajú nenahraditeľné pri získavaní prvotných dát, analytické prístupy a modely, ako HFCAS, Reasonov model a Shell model, poskytujú cenný rámec pre identifikáciu hlbších systémových príčin a vplyvu ľudského faktora.

Aplikácia analyzovaných metód na vybraných historických nehodách demonštrovala ich praktickú využiteľnosť pri rekonštrukcii priebehu udalostí a identifikácii kľúčových prispievajúcich faktorov. Výsledky práce zdôrazňujú potrebu kombinácie rôznych metód na získanie uceleného obrazu o príčinách nehôd.

Napriek rozsahu tejto analýzy existujú oblasti pre budúci výskum. Zvýšenú pozornosť by si zaslúžila hlbšia integrácia rôznych vyšetrovacích metód a vývoj komplexných metodologických rámcov, ktoré by zohľadňovali neustály technologický pokrok v letectve. Kľúčovou výzvou zostáva aj efektívne prepojenie výsledkov vyšetrovaní s implementáciou účinných preventívnych opatrení, ktoré sú nevyhnutné pre neustále zvyšovanie úrovne bezpečnosti leteckej dopravy. Táto práca tak prispieva k hlbšiemu pochopeniu zložitosti vyšetrovania leteckých nehôd a zdôrazňuje význam neustáleho vývoja a adaptácie metodologických prístupov v tejto kriticky dôležitej oblasti.

PodĎakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: "Výskum a vývoj bezkontaktných metód pre získavanie geopriestorových údajov za účelom monitoringu lesa pre zefektívnenie manažmentu lesa a zvýšenie ochrany lesov", kód ITMS 313011V465, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Referencie

- [1] EURÓPSKY PARLAMENT. *Riziká v oblasti bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci* [online]. 2013 [cit. 2025-04-15]. Dostupné na: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/fiches_tech_niques/2013/050610/04A_FT\(2013\)050610_SK.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/fiches_tech_niques/2013/050610/04A_FT(2013)050610_SK.pdf)
- [2] MATERNA, M. a MATERNOVÁ, A. *Bezpečnosť v leteckej doprave*. Žilina: EDIS, 2024.

- [3] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *CICTT Hazard Taxonomy* [online]. 2014-03 [cit. 2025-03-08]. Dostupné na: <https://www.icao.int/SAM/Documents/2017-SSP-BOL/CICTT%20Hazard%20Taxonomy.pdf>
- [4] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION a EUROCONTROL. *Just Culture*. Skybrary [online]. [cit. 2024-03-08]. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/just-culture>
- [5] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Safety Management Manual – 3rd ed.* [online]. 2012 [cit. 2024-03-08]. Dostupné na: https://www.icao.int/sam/documents/rst-smsssp-13/smm_3rd_ed_advance.pdf
- [6] HOWELL, C. *Understand Reactive, Predictive and Proactive Risk Management in Aviation SMS*. Aviation Safety Blog [online]. 2023-04-05 [cit. 2024-03-11]. Dostupné na: <https://aviationsafetyblog.asms-pro.com/blog/understand-reactive-predictive-and-proactive-risk-management-in-aviation-sms>
- [7] NÁRODNÁ RADA SLOVENSKEJ REPUBLIKY. *Zákon č. 143/1998 Z.z. o civilnom letectve* [online]. 1998-04-02 [cit. 2024-03-11]. Dostupné na: https://static.slovlex.sk/static/SK/ZZ/1998/143/vyhlase_znenie.html
- [8] ZUSKA, A. *Tenerife – štyridsať rokov po*. Aeroweb [online]. 2017-03-27 [cit. 2025-03-02]. Dostupné na: <https://www.aeroweb.cz/clanky/5356-tenerife-ctyricet-let-pote>
- [9] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *TWA800 In-Flight Breakup* [online]. 2011-01 [cit. 2025-03-02]. Dostupné na: <https://sma.nasa.gov/docs/default-source/safety-messages/safetymessage-2011-01-09-twa800inflightbreakup.pdf>
- [10] SCHIAVO, M. F. a BRAUCHLE, J. R. *Air France Flight 447*. MotleyRice [online]. [cit. 2025-03-15]. Dostupné na: <https://www.motleyrice.com/aviation-lawsuit/air-france-flight-447>
- [11] EURÓPSKY PARLAMENT. *Bezpečnostné predpisy v letectve* [online]. 2021-10-18 [cit. 2025-03-15]. Dostupné na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/?uri=LEGISSUM:tr0046>
- [12] NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. *CVR/FDR Overview*. NTSB [online]. [cit. 2025-03-15]. Dostupné na: https://www.nts.gov/news/Pages/cvr_fdr.aspx
- [13] PACKER, K. F. a MORIN, C. R. *The Role of the NTSB in Aviation Safety*. SMU Scholar [online]. 1974 [cit. 2025-03-19]. Dostupné na: <https://scholar.smu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2050&context=jalc>
- [14] FRATCZAK, D. a KONIECZKA, R. *The Model of Reporting System in Civil Aviation*. ICI Journals Master List [online]. 2018 [cit. 2025-03-19]. Dostupné na: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/1291719.pdf>
- [15] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Quantitative Safety Analysis*. Skybrary [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné na: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3708.pdf>
- [16] SAFETY, S. A. *Quantitative Safety Levels*. Skybrary [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/quantitative-safety-levels>
- [17] BAZANT, M. *FTA – Fault Tree Analysis*. Bazant Wordpress [online]. 2011-06-02 [cit. 2025-04-10]. Dostupné na: <https://bazant.wordpress.com/2011/02/06/fta-fault-tree-analysis-strom-porch/>
- [18] CENTRALEYES. *Semi-Quantitative Risk Assessment*. Centraleyes [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné na: <https://www.centraleyes.com/glossary/semi-quantitative-risk-assessment/>
- [19] EURÓPSKA ÚNIA. *Smernica o bezpečnostnom manažmente v letectve* [online]. 2019-12-02 [cit. 2025-04-12]. Dostupné na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019XC1220%2801%29>
- [20] SAFETY, S. A. *HFACS – Human Factors Analysis and Classification System*. Skybrary [online]. [cit. 2025-03-02]. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/human-factors-analysis-and-classification-system-hfacs>
- [21] DURGUT, M. *Swiss Cheese Model*. Aviationfile [online]. 2020-09-13 [cit. 2025-03-02]. Dostupné na: <https://www.aviationfile.com/swiss-cheese-model/>
- [22] KNUDSEN, A. *SHELL Model in Aviation*. Naviminds [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné na: <https://naviminds.com/shell-model-aviation/>



DETEKCIA RUŠENIA GNSS SIGNÁLU PROSTREDNÍCTVOM ADS-B PRIJÍMAČOV

Oliver Trnkus
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Andrej Novák
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

In this thesis, the detection of GNSS interference by ADS-B receivers and its impact on the accuracy of air navigation is investigated. GNSS systems are important for modern aviation and can be jammed, which threatens the safety of air traffic. ADS-B is a GNSS dependent system which allows monitoring and identification of areas of increased interference. As GNSS jamming events become more frequent, there is an increasing need for reliable approaches to detect jamming and minimise its impact. ADS-B can help to identify unusual deviations in navigation and contribute to improving the safety of air traffic. The survey highlights the need to protect GNSS signals and develop technologies for their detection.

Keywords

GNSS, ADS-B receivers, Interference detection

1. Úvod

Globálne navigačné satelitné systémy (GNSS) dnes patria medzi základné technológie, ktoré sa používajú nielen v bežnom živote, ale najmä v doprave a v letectve. Lietadlá používajú v súčasnosti GNSS hlavne na určenie presnej polohy, GS (ground speed) a ďalších parametrov ako smer vetra, čo je nevyhnutné pre bezpečnú a spoľahlivú navigáciu. V dnešnej dobe bez signálu GNSS by veľa moderných systémov v letectve nefungovalo alebo by sa museli nahradiť menej modernými riešeniami. Práve preto je dôležité, aby bol GNSS signál stabilný a chránený pred rôznymi druhmi rušenia. V posledných rokoch sa čoraz častejšie začali vyskytovať prípady rušenia GNSS signálov. Rušenie môže byť neúmyselné, napríklad ak ho spôsobí iné elektronické zariadenie, ale môže byť aj úmyselné, ako zámerné útoky na systém. Tieto javy môžu spôsobiť vážne problémy, ako chyby údajov o polohe až po úplnú stratu navigačných schopností lietadla. Často nebudujú okamžite viditeľné a prejavujú sa len miernymi odchýlkami v letových trasách.

Tento článok sa zameriava na problematiku rušenia GNSS signálu a na možnosti jeho detekcie prostredníctvom systému ADS-B. Tento systém sa v letectve využíva na monitorovanie a sledovanie lietadiel, pričom určenie polohy závisí od údajov z GNSS, čo z neho robí vhodný nástroj na sledovanie zmien v leteckej prevádzke, ktoré môžu signalizovať rušenie signálu. Zameriava sa tiež na využitie verejne dostupných platforiem ako Flightradar24 a OpenSky Network, ktoré poskytujú údaje o letových trasách a môžu pomôcť identifikovať odchýlky spôsobené rušením GNSS signálu. Tieto platformy umožňujú analyzovať pohyb lietadiel v reálnom čase, čo prispieva k posilneniu bezpečnosti leteckej prevádzky. Na princípe príjmu signálu ADS-B, resp. odpovedí sekundárneho radaru A/C/S z lietadla na frekvencii 1090 MHz, je založených viacero podobných platforiem, no pre účely tohto článku boli vybrané práve tieto dve vzhľadom na ich robustnosť, dostupnosť a celosvetové pokrytie.

2. Metodika a metódy skúmania

Článok vychádza z poznatkov spracovaných z odbornej literatúry, článkov z oblasti GNSS a ADS-B technológií, ako aj z verejne dostupných dátových platforiem ako Flightradar24 a OpenSky Network. Analýza bola zameraná na identifikáciu prípadov rušenia GNSS signálu prostredníctvom sledovania letových dráh v oblastiach so zvýšeným rizikom výskytu anomálií, akými sú náhle odchýlky v trase, výpadky polohy alebo výpadky v prenose dát systému ADS-B.

2.1. GNSS a hlavné zložky

Globálny navigačný satelitný systém, známy pod skratkou GNSS, je technológia umožňujúca na presné určenie polohy a času na ktoromkoľvek mieste na Zemi. Základom tejto technológie sú satelity, ktoré sa nachádzajú na obežnej dráhe Zeme a vysielajú špecifické signály. Tieto signály obsahujú informácie o aktuálnej polohe satelitov, čase vyslania signálu a ďalších parametrov potrebných na výpočet polohy prijímačov na Zemi. Princíp fungovania GNSS spočíva v trilaterácii – teda v určení polohy na základe vzdialeností od niekoľkých satelitov, ktoré sa dajú vypočítať z časového oneskorenia prijatého signálu.

GNSS je postavený na troch hlavných komponentoch. Vesmírny segment zahŕňa satelity, ktoré obiehajú vo výškach 20 000 do 37 000 km nad povrchom Zeme. Tieto satelity vysielajú údaje o svojom stave, polohe a presnom čase. Medzi najznámejšie satelitné navigačné systémy patria GPS, ktoré spravujú USA, GLONASS z Ruska, európsky systém Galileo a čínsky BeiDou. K nim sa pridávajú aj regionálne systémy, ako je japonský QZSS či indický IRNSS, ktoré sa zameriávajú na špecifické oblasti rozšírených služieb pre satelitnú navigáciu, ale aj pre pátranie a záchranu. Ďalšou dôležitou časťou je riadiaci segment, ktorý zahŕňa pozemné stanice zodpovedné za kontrolu a kalibráciu satelitov. Tieto stanice monitorujú dráhy satelitov, aktualizujú ich údaje v databáze almanach a zabezpečujú ich správnu funkciu. Tretím komponentom je užívateľský segment, ktorý

zahŕňa zariadenia, ako sú GPS prijímače v mobilných telefónoch, automobiloch, lodiach, vlakoch, lietadlách alebo špecializované prístroje v oblasti geodézie a kartografie a ďalších odvetví. Vďaka spolupráci všetkých týchto segmentov umožňuje GNSS široké využitie v každodennom živote, od navigácie v autách cez synchronizáciu času v telekomunikačných sieťach až po vedecký výskum a záchranné operácie. Táto technológia je dôležitá pre moderný svet, pričom jej rozvoj pokračuje zavádzaním nových rozšírených satelitných systémov a zlepšovaním presnosti, kontinuity a integrity signálu [1].

2.2. Typy GNSS systémov

V súčasnosti existujú štyri hlavné globálne konštelácie a dve regionálne, ktoré tvoria základ GNSS.

Globálny polohový systém (GPS), spravovaný Spojenými štátmi americkými, je prvým a najstarším systémom GNSS na svete. Jeho činnosť začala v roku 1978, pričom plnú globálnu dostupnosť dosiahol v roku 1994. GPS pozostáva z 31 aktívnych satelitov na obežnej dráhe, ktoré zabezpečuje a riadi americké letectvo. Tento systém poskytuje vysokú presnosť a je jedným z najpoužívanějších na svete.

GLONASS, systém prevádzkovaný Ruskom bol, vyvinutý ako odpoveď na GPS. Prvé testovacie satelity boli vypustené v roku 1982, pričom funkčnosť bola dosiahnutá v roku 1993 so sústavou 12 satelitov. V súčasnosti GLONASS zahŕňa 26 satelitov a jeho prevádzku zabezpečujú ruské letecké obranné sily.

Galileo, európsky navigačný systém, je výsledkom spolupráce Európskej vesmírnej agentúry (ESA) a Agentúry Európskej únie pre vesmírny program (EUSPA). Galileo začal poskytovať služby v roku 2016 a v súčasnosti disponuje 24 aktívnymi satelitmi a dvomi základňami na Zemi. Je to systém zameraný na civilné využitie s vysokou presnosťou.

Navigačný satelitný systém BeiDou (BDS), vyvinutý Čínou, začal ako regionálny systém s obmedzeným pokrytím v roku 2000. Postupom času sa rozšíril na globálny systém, ktorý od roku 2018 poskytuje celosvetové služby. Čína vypustila celkovo 55 satelitov v rámci rôznych generácií systému BDS, pričom v prevádzke je momentálne 35 z nich.

Indický regionálny navigačný satelitný systém (IRNSS), známy aj ako NavIC, je navigačný systém Indie. Jeho konštelácia, pozostávajúca zo siedmich satelitov, začala fungovať v roku 2018. NavIC pokrýva celú Indiu a susedné regióny, pričom ponúka dve úrovne služieb: štandardné pre civilné využitie a šifrované pre autorizovaných používateľov.

Quasi-Zenith satelitný systém (QZSS), ktorý prevádzkuje Japonsko, je regionálny systém určený pre ázijsko-oceánsky región. Jeho konštelácia zahŕňa štyri satelity a systém je funkčný od novembra 2018 [2].

2.3. Čo je ADS-B

ADS-B, teda Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, predstavuje významný technologický pokrok v monitorovaní vzdušného priestoru. Táto technológia využíva transpondér Trig, ktorý je často integrovaný s GPS, na poskytovanie vysoko presných údajov o polohe. Informácie sú prenášané do pozemných riadiacich centier, ako aj priamo k iným lietadlám.

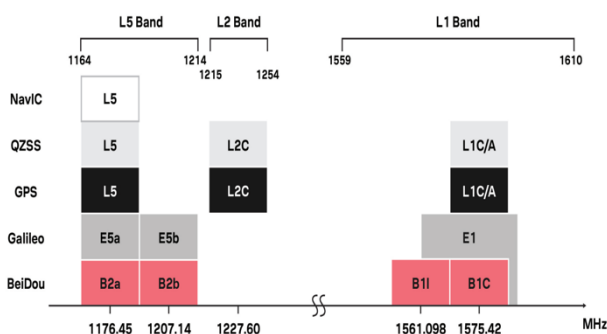
Tento typ vysielania sa označuje ako ADS-B Out. V porovnaní s tradičnými radarovými systémami ponúka ADS-B výrazne lepšie dosah a presnosť. Vďaka tomu môžu riadiaci letovej prevádzky bezpečne znížiť minimálne rozstupy medzi lietadlami vybavenými ADS-B, čo je dôležité pre efektívne riadenie preťaženého vzdušného priestoru [3]. ADS-B pracuje na princípe vysielania údajov o polohe, rýchlosti a ďalších dôležitých parametroch lietadla, ktoré sú získavané zo systému GNSS. Pozemné stanice, ktoré tieto údaje prijímajú a spracúvajú, sú podstatne lacnejšie ako klasické radary. Tieto stanice slúžia na poskytovanie dát pre situačné displeje, ktoré využívajú riadiaci letovej prevádzky. ADS-B sa stal obzvlášť užitočným v oblastiach bez radarového pokrytia, kde ho niektoré štáty zaviedli na zlepšenie riadenia prevádzky. Tento systém umožnil znížiť rozstupy medzi lietadlami z pôvodných 148,1 km na 9,2 km, čo viedlo k zvýšeniu kapacity vzdušného priestoru. Okrem toho prispel k zníženiu spotreby paliva a emisií, čím sa zlepšila ekologická udržateľnosť leteckej dopravy [4].

2.4. Definícia rušenia GNSS signálov a ako k tomu dochádza

Globálny navigačný satelitný systém (GNSS) pomáha zlepšiť výkonnosť navigácie a podporuje dohľad riadenia letovej prevádzky. GNSS vie dosiahnuť všetky výhody len vtedy, ak sú signály GNSS primerane chránené pred elektromagnetickým rušením, ktoré by mohlo spôsobiť stratu alebo zhoršiť služby GNSS. Zdrojmi rušenia GNSS môžu byť systémy ktoré pracujú v rovnakých frekvenčných pásmach ako GNSS ale aj systémy ktoré sú pracujúce mimo týchto pásiem. To naznačuje že rušenie môže byť úmyselné ale aj neúmyselné [5]. Rušenie GNSS zahŕňa akékoľvek druhy rušenia, ktoré môžu narušiť normálne fungovanie navigačných systémov založených na GNSS. Rozdeľujú sa na dve hlavné kategórie a to je jamming (rušenie signálu) a spoofing (falošné signály) [6]. GNSS signály sú príliš citlivé na rádiové rušenie. Spoločnosť Septentrio sa už 15 rokov zaoberá riešením tohto problému a zdokonaľuje jedinečné systémy na zmiernenie rušenia, adaptívneho filtrovania, vypínania impulzov a jedinečné zmierňovanie rušenia v širokom pásme [7]. Pre rušenie GNSS sa vytvárajú signály, ktoré sú dostatočne silné na to, aby prekonávali vysielanie zo satelitov GNSS. Hoci signály GNSS sa vysielajú z obežnej dráhy sú zvyčajne z výšky viac ako 6 km nad povrchom Zeme, potrebujú prekonať veľké vzdialenosti pokým sa dostanú k pozemným staniciam alebo prijímačom. To spôsobuje že vytvára signál s nízkym výkonom a robí ich čoraz viac zraniteľnými voči rádiovému rušeniu a proti útoku carry-off (bežný útok typu spoofing).

Aj keď satelitné signály môžu byť rušené neúmyselne, často ide o zámerný cieľ a čoraz viac jednotlivcov a subjektov používa stratégie na rušenie GNSS signálov, zvyčajne s cieľom zabrániť sledovanie zariadení ako aj vozidiel, lodí alebo lietadiel. GNSS satelity sa spoliehajú na tri hlavné pásma rádiových frekvencií a to L1, L2 a L5 ktoré sú zobrazené na obrázku 1. Kým väčšina starších satelitov využíva pásma L1 a L2, novšie systémy sú navrhnuté tak, aby pracovali v pásme L5, ktoré ponúka vyššiu presnosť a spoľahlivosť. Tieto systémy však používajú veľmi slabé rádiové signály, ktoré sú náchylné na rušenie. Takéto rušenie môže vážne ovplyvniť presnosť údajov o polohe, čase či rýchlosti, čo vedie k problémom s navigáciou.

Zdroj: [https://content.u-](https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/GPS-signals-migration-wp.pdf)



[blox.com/sites/default/files/documents/GPS-signals-migration-wp.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/GPS-signals-migration-wp.pdf)

Obrázok 1: Frekvencie a rozloženie kanálov v pásme L

Keďže veľká časť infraštruktúry je závislá od GNSS systémov, ich rušenie môže spôsobiť nielen technologické výpadky, ale aj výrazné ekonomické škody. Z tohto dôvodu je ochrana GNSS signálov kriticky dôležitá o čom svedčí aj právna úprava zameraná na monitorovanie a detekciu rušenia signálov [8].

2.4.1. Jamming (rušenie signálu)

Neúmyselné rušenie často spôsobujú rôzne elektronické zariadenia. Problémy môžu nastať v dôsledku signálov v blízkosti spektra GNSS alebo priamo v ňom. Napríklad zariadenia USB 3.0 či niektoré LIDAR senzory môžu vytvárať rušenie v pásme GPS L1 (1575,42 MHz $\pm$ 10MHz), čo vedie k nepresnostiam v určovaní polohy, ak nie je zabezpečené dostatočné tienenie. Zámerné rušenie je známe ako jamming, spočíva vo vysielaní silných rádiových signálov, ktoré potlačia slabšie GNSS signály, čím sa zabráni správnej funkcii prijímačov v danej oblasti. Je potrebné zdôrazniť, že zámerné rušenie nie je len otázkou vojenských konfliktov ale často ho spôsobujú lacné a nelegálne GPS rušičky, používané na znemožnenie sledovania polohy áut alebo nákladných vozidiel. Rušenie GNSS predstavuje úmyselné blokovanie GNSS signálov pomocou zariadení, ako sú softvérovo definované rádiové vysielacie, ktoré vysielajú signály vo frekvenčných pásmach GNSS. V minulosti bolo rušenie bežné v určitých oblastiach, napríklad na hranici medzi Severnou a Južnou Kóreou. Takéto rušenie však nie je obmedzené len na konfliktné zóny, pretože zariadenia na ochranu súkromia sú voľne dostupné. Tie často bránia monitorovaniu vodičov nákladných vozidiel. Hoci rušenie môže byť problematické, nie je také sofistikované ani presné ako spoofing [10].

2.4.2. Spoofing (falošné signály)

Spoofing predstavuje zámerné vysielanie falošných GNSS signálov s cieľom oklamať prijímač, ktorý následne hlási nesprávnu polohu alebo čas. Tento typ útoku je vždy úmyselný a vykonáva sa tak, že rušenie preťaží prijímač, po čom nasleduje vysielanie falošného satelitného signálu. Spoofer využíva rovnakú štruktúru a frekvenciu ako GNSS signály, pričom manipuluje ich výkonnosť tak, aby prijímač preferoval vysielaný signál. Proces spoofingu GNSS signálov je znázornený na obrázku 4 [9]. V leteckých aplikáciách môže spoofing cieľom útočiť na konkrétne lietadlá. Útočník, ktorý pozná ich polohu, môže vyslať falošné signály a ovplyvniť ich navigáciu. Tento druh útoku vyžaduje značné zdroje a sofistikované vybavenie, často spájané s aktérmi, ako sú štátne organizácie alebo teroristické skupiny. Na ochranu pred spoofingom sa využívajú kódované signály GNSS a kombinácia GNSS s inerciálnymi navigačnými systémami (INS), ktoré nie sú náchylné na manipuláciu [10].

3. Zdroje ADS-B dát pre analýzu

Flightradar24 vznikol pôvodne ako hobby projekt ešte v roku 2006, keď sa dvaja leteckí nadšenci zo Švédska rozhodli vybudovať vlastnú sieť ADS-B prijímačov v severnej a strednej Európe. V roku 2009 sprístupnili túto sieť aj ostatným používateľom, ktorí mohli svoje údaje zo svojich prijímačov poslať do systému. Postupne sa tak podarilo pokryť mnohé časti sveta, no snaha o zabezpečenie celosvetového pokrytia ADS-B stále pokračuje [11]. V súčasnosti predstavuje globálnu

platformu na monitorovanie letovej prevádzky, ktorá poskytuje aktuálne údaje o pohybe lietadiel po celom svete. Systém využíva kombináciu rôznych zdrojov dát, predovšetkým ADS-B a MLAT, doplnených o satelitné a radarové informácie. Tieto lokalizačné údaje sú následne spracované a obohatené o informácie o letovom poriadku a taktiež o stave letu, čím vzniká komplexný prehľad o leteckej doprave v reálnom čase [12].

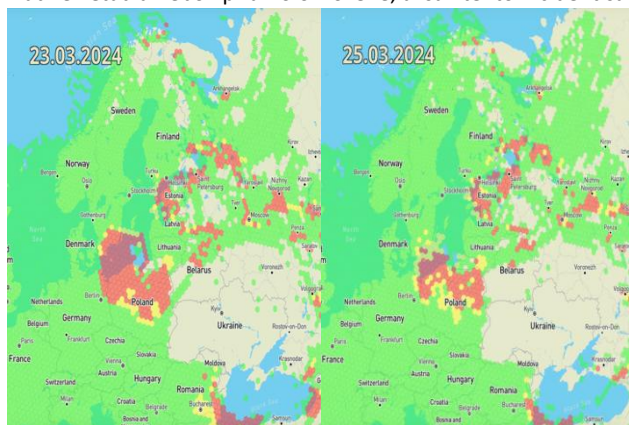
OpenSky Network je nezisková organizácia so sídlom vo Švajčiarsku, ktorá sa zameriava na zlepšenie bezpečnosti, spoľahlivosti a efektívnosti riadenia vzdušného priestoru. Jej základom je rozsiahla sieť prijímačov spravovaných dobrovoľníkmi, priemyselnými partnermi a akademickými či vládovými inštitúciami. Všetky zhromaždené dáta sú archivované v rozsiahlej historickej databáze, ktorá poskytuje výskumníkom prístup k údajom pre analýzu a optimalizáciu riadenia letovej prevádzky [13].

Táto platforma bola spustená v roku 2013 a odvtedy zabezpečuje systematický zber údajov o letovej prevádzke prostredníctvom technológií ako ADS-B, Mód-S, TCAS, a FLARM. Na rozdiel od iných platforiem poskytuje OpenSky Network úplné, nefiltrované a surové dáta, ktoré sú dostupné predovšetkým akademickej a výskumnej sfére. V súčasnosti spravuje viac než 5 000 prijímačov po celom svete a disponuje databázou obsahujúcou vyše 30 miliónov zachytených správ. Týmto spôsobom predstavuje jeden z najrozsiahlejších zdrojov dát o letovej prevádzke, čo umožňuje podrobnú analýzu a výskum GNSS interferencií či vývoj inovatívnych riešení pre zvýšenie bezpečnosti v letectve [14].

3.1. Neočakávané zmeny trasy a výpadky signálu

V roku 2024 koncom marca, došlo v severnej Európe k masívnemu rušeniu GPS signálov, ktoré ovplyvnilo viac ako 1600 lietadiel. Podľa všetkých indícií pochádza zdroj tohto rušenia z Kaliningradu v Rusku. Lietadlá lietajúce nad Poľskom, Švédskom a ďalšími štátmi v Pobaltí zaznamenali výrazné výpadky GPS signálov. Tento incident je považovaný za najrozsiahlejší prípad rušenia GPS v tejto oblasti, ktorý bol kedy zaznamenaný. Podľa gpsjam.org a Flightradar24 zasiahlo rušenie najmenej 1600 lietadiel, pričom najväčšie výpadky sa vyskytli medzi 23. a 25. marcom 2024 vid' na obrázku 2.

Žiadne lietadlá neboli priamo ohrozené, avšak tento incident sa



Obrázok 2: Rušenie signálu GPS v údajoch 23.3.2024 a 25.3.2024

považuje za znepokojujúci prejav kybernetickej vojny. Mnohé zdroje za príčinu tohto rušenia označujú Ruskú federáciu, pričom podozrenia vedú k oblasti Kaliningradu, ruskému územiu ležiacemu medzi Poľskom a Litvou. Nie je vylúčené, že ide o náhodu no od roku 2018 do roku 2021 Eurocontrol zaznamenal dramatický nárast porúch navigačných systémov, konkrétne 20-násobný vzostup prípadov spôsobených rádiovým rušením. Odhady medzinárodnej organizácie pre bezpečnosť leteckej dopravy naznačujú, že tieto výpadky sú prevažne dôsledkom používania rušičiek v oblastiach aktívnych alebo potenciálnych vojenských konfliktov. Rušičky môžu byť nasadené s cieľom zabrániť použitiu raketových a iných vojenských alebo výskumných prostriedkov. Medzi známe oblasti s nespôľahlivým GPS signálom patrí okrem Kaliningradu aj Cyprus, Turecko, Sýria a Izrael. Okrem zjavného rušenia signálov sa piloti niekedy stretávajú aj s falošnými GPS signálmi. Tento trend vyvoláva obavy, že narušenie navigačných systémov je súčasťou širšej kybernetickej a vojenskej taktiky [15].

4. Výsledky

V rámci článku boli predstavené možnosti využitia verejne dostupných platforiem, ako sú Flightradar24 a OpenSky Network, ktoré poskytujú dáta zo systému ADS-B v reálnom čase. Hoci nebola vykonaná vlastná analýza dát, na základe štúdií odborných zdrojov a prípadových štúdií bolo poukázané na to, že tieto platformy môžu byť užitočné pri sledovaní možných výpadkov alebo odchýlok v polohe lietadiel.

Pozorované anomálie v iných štúdiách často súviseli s náhlymi zmenami letovej trasy, výpadkami signálu alebo nestabilným správaním ADS-B údajov, najmä v oblastiach so známym

výskytom GNSS rušenia, ako je východná Európa alebo Blízky východ. Takéto prípady naznačujú, že ADS-B môže slúžiť ako indikátor narušenia navigačného signálu.

5. Záver

Článok sa venoval problematike rušenia GNSS signálu a možnostiam, ako môže systém ADS-B prispieť k jeho detekcii. V teoretickej časti boli predstavené princípy fungovania GNSS systémov, ich zraniteľnosti a dôvody, prečo je ochrana týchto signálov dôležitá najmä v letectve. Pozornosť bola zameraná aj na ADS-B systém, ktorý je na GNSS priamo naviazaný a vďaka tomu dokáže indikovať možné problémy s navigáciou. Opísané boli aj prípady rušenia GNSS vo svete a oblasti, kde sa takéto rušenie vyskytuje najčastejšie, ako aj možnosti využitia verejných platforiem Flightradar24 a OpenSky Network pri sledovaní potenciálnych výpadkov signálu.

Z analýzy poznatkov vyplýva, že rušenie GNSS signálu má rastúci trend a v prostredí letectva predstavuje významné riziko. Spoľahlivosť satelitnej navigácie je pre moderné letectvo kľúčová a jej výpadky môžu ovplyvniť bezpečnosť a plynulosť prevádzky. Aj keď ADS-B nebol navrhnutý ako nástroj na detekciu rušenia, jeho prepojenie s GNSS z neho robí účinný indikátor možných anomálií.

V praxi možno pozorovať situácie, v ktorých sa na základe ADS-B dát vyskytujú náhle odchýlky v polohe či výpadky signálu, čo môže signalizovať rušenie alebo jeho zneužitie. Sledovanie týchto údajov môže významne prispieť k včasnej identifikácii rizikových oblastí. Ako perspektívne riešenie sa javí využívanie dostupných platforiem, ktoré by mohli automaticky vyhodnocovať dáta z viacerých zdrojov a spoľahlivo identifikovať podozrivé javy. Rovnako je dôležité vytvárať legislatívne a prevádzkové rámce na efektívne zdieľanie informácií medzi štátmi, leteckými spoločnosťami a poskytovateľmi služieb, ako aj zvyšovať povedomie o problematike rušenia GNSS medzi pilotmi, riadiacimi letovej prevádzky a technickým personálom.

Referencie

- [1] HEXAGON. What are Global Navigation Satellite Systems? novatel.com [online]. Cit z : <https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss> [cit 2 marec 2025 a].
- [2] WINDWARD, 2024. Global Navigation Satellite System (GNSS). Windward [online]. 2024. Cit z : <https://windward.ai/glossary/gnss-global-navigation-satellite-systems/> [cit 2 marec 2025].
- [3] TRIG, 2014. Introduction to ADS-B. Trig Avionics [online]. 23 september 2014. Cit z : <https://trig-avionics.com/knowledge-bank/ads-b/introduction-to-ads-b/> [cit 2 marec 2025].
- [4] ICAO, 2012. Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual [online]. ICAO. Cit z : <https://www.icao.int/meetings/anconf12/documents/doc.%209849.pdf> [cit 2 marec 2025].
- [5] SKYBRARY. Interference to GNSS Signals. SKYbrary [online]. Cit

- z : <https://skybrary.aero/articles/interference-gnss-signals> [cit 2 marec 2025].
- [6] GPSPATRON, 2023. GNSS Interference Monitoring and Classification for Critical Infrastructure Safety | GPSPATRON.com. GPSPATRON [online]. 31 január 2023. Cit z : <https://gpspatron.com/gnss-interference-monitoring-and-classification-for-critical-infrastructure-safety/> [cit 2 marec 2025].
- [7] SEPTENTRIO, 2020. GNSS Interference [online]. ESA-Pierre Carril. Cit z : [https://www.ion.org/gnss/upload/files/2157_Septentr io_GNSS_Interference_A5_LR.pdf](https://www.ion.org/gnss/upload/files/2157_Septentr_io_GNSS_Interference_A5_LR.pdf) [cit 2 marec 2025].
- [8] GNSS JAMMING. GNSS Jamming. GNSS Jamming [online]. Cit z : <https://www.gnssjamming.com/gnss-jamming> [cit 2 marec 2025].
- [9] SBS SYSTEMS, 2024. SBG Systems response to GNSS Jamming and Spoofing. LinkedIn [online]. 15 január 2024. Cit z : <https://www.linkedin.com/pulse/sbg-systems-response-gnss-jamming-spoofing-sbgsystems-yso9e> [cit 3 marec 2025].
- [10] HEXAGON. Spoofing. Hexagon [online]. Cit z : <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/gnss-threats/spoofing> [cit 3 marec 2025 b].
- [11] ECA PILOTING SAFETY, 2024. Manipulated GNSS Signals: implications for pilots. ECA Piloting Safety [online]. 29 apríl 2024. Cit z : <https://www.eurocockpit.eu/news/manipulated-gnss-signals-implications-pilots> [cit 3 marec 2025].
- [12] LOMAS, Chris, 2025. How does Flightradar24 track aircraft? | Flightradar24 Blog. Flightradar24 [online]. 30 január 2025. Cit z : <https://www.flightradar24.com/blog/inside-flightradar24/how-does-fr24-track-aircraft/> [cit 3 marec 2025].
- [13] UNIVERSITY OF TORONTO. OpenSky Network databases. University of Toronto Libraries [online]. Cit z : <https://mdl.library.utoronto.ca/collections/numeric-data/statistics/opensky-network-databases> [cit 3 marec 2025].
- [14] ELTON, Ahmed, 2023. Open Air Traffic data - OpenSky Network. *kaggle* [online]. 2023. Cit z : <https://www.kaggle.com/datasets/ahmedeltom/open-air-traffic-data-opensky-netwrok> [cit 12 apríl 2025].
- [15] FLIGHTRADAR24. How flight tracking works. *Flightradar24* [online]. Cit z : <https://www.flightradar24.com/how-it-works> [cit 12 apríl 2025 b].
- [16] KASÍK, Pavel, 2024. Masivní útok na GPS zasáhl 1600 letadel. Stopy vedou do ruského Kaliningradu - Seznam Zprávy. *Seznam Zprávy* [online]. 9 apríl 2024. Cit z : <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/zahranicni-masivni-utok-na-gps-zasahl-1600-letadel-stop-y-vedou-do-ruskeho-kaliningradu-249404> [cit 3 marec 2025].



MODELOVANIE VZDUŠNÝCH PREISTOROV V PROSTREDÍ ESCAPE LIGHT SIMULÁTORA ATC PRE POTREBY VÝUČBY NA KATEDRE LETECKEJ DOPRAVY

Maximilián Virga
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Benedikt Badánik
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article addresses the issue of airspace modeling in the Escape Light air traffic control simulator with the aim of supporting educational activities at the Department of Air Transport of the University of Žilina. The objective is to analyze the methods of creating airspace models on ATC simulators both in Slovakia and abroad, and subsequently to develop and optimize a model of the Žilina Airport airspace based on defined requirements for the model itself and for training purposes. The thesis examines current practices used at domestic and international institutions and defines the criteria that the created model must meet for simulated air traffic control operations. It also presents the process of optimizing the model for the Escape Light environment and its adaptation for practical application in training. The conclusion evaluates the achieved results, identifies limitations, and proposes recommendations for further improvements to the developed model.

Keywords

Escape Light. Air traffic control. Simulator. Airspace. Education

1. Úvod

V procese výcviku riadiacich letovej prevádzky zohrávajú významnú úlohu simulátory, ktoré umožňujú precvičovanie štandardných aj mimoriadnych situácií v prostredí podobnom reálnym podmienkam.

Simulačné technológie zároveň rozširujú možnosti výučby aj v rámci univerzitného vzdelávania. V akademickom prostredí pomáhajú študentom vizualizovať princípy riadenia, porozumieť štruktúre vzdušného priestoru a oboznámiť sa s praktickými aspektmi prevádzky. Práca s takýmto nástrojom dokáže priblížiť študentom komplexnosť rozhodovacích procesov v reálnom čase a pripraviť ich na skutočný výcvik v riadnom výcvikovom centre.

Vytváranie kvalitného simulačného prostredia úzko súvisí s presným modelovaním vzdušných priestorov. Správne vymedzenie sektorov, navigačných bodov či letových tratí vytvára základ pre realistické cvičenia a výučbové scenáre.

Cieľom tohto článku je analyzovať spôsoby modelovania vzdušných priestorov na pracoviskách simulovania riadenia letovej prevádzky v Slovenskej republike a v zahraničí a vytvoriť model vzdušného priestoru letiska Žilina v prostredí simulátora Escape Light. Tento model bude slúžiť na výučbu a demonštráciu pre študentov študijného programu letecká doprava na Katedre leteckej dopravy Žilinskej univerzity v Žiline ako zdroj cenných informácií a možnosť pochopiť princípy riadenia letovej prevádzky. Táto práca na základe stanovených požiadaviek hodnotí vhodnosť vytvoreného modelu a jeho implementácie pre potreby výučby.

2. Metodika a metódy skúmania

V prvej časti článku sú rozpísané základné poznatky o vzdušnom priestore – triedy a rozdelenie vzdušného priestoru.

2.1. Vzdušný priestor

Vzdušný priestor predstavuje základný prvok leteckej infraštruktúry, v ktorom sa uskutočňuje letecká prevádzka. Každý štát má svoj vzdušný priestor. Podľa zákona 143/1998 Z.z. o civilnom letectve je vzdušný priestor Slovenskej republiky definovaný ako *vzdušný priestor nad územím Slovenskej republiky do výšky, v ktorej možno vykonávať leteckú prevádzku*. [1]

Vzdušný priestor sa delí na triedy A až G. Každá trieda má svoje špecifiká. Na Slovensku máme vzdušný priestor triedy C, D, a G.

Trieda C

V tejto triede sú povolené lety IFR aj VFR. Rozstupy sú dodržiavané medzi letmi IFR navzájom a medzi letmi IFR a VFR. Poskytovaná je služba riadenia letovej prevádzky pre IFR lety a VFR lety dostávajú informácie o premávke (na požiadanie aj odporúčania na vyhnutie sa). Maximálna rýchlosť je 250 kt IAS pod 10 000 ft AMSL. Je potrebné obojstranné rádiové spojenie. Všetky lety sú predmetom letového povolenia.

Trieda D

V tejto triede sú povolené lety IFR aj VFR. Rozstupy sú dodržiavané len medzi IFR letmi. Poskytovaná je služba riadenia letovej prevádzky pre IFR lety a poskytujú sa informácie o premávke VFR letov (na požiadanie aj odporúčania na vyhnutie sa). Maximálna rýchlosť je 250 kt IAS pod 10 000 ft AMSL. Je

potrebné obojstranné rádiové spojenie. Všetky lety sú predmetom letového povolenia.

Trieda G

V tejto triede sú povolené lety IFR aj VFR. Rozstupy nie sú dodržiavané. Poskytovaná je len informačná služba letovej prevádzky. Maximálna rýchlosť je 250 kt IAS pod 10 000 ft AMSL. IFR lety musia mať obojstranné rádiové spojenie, zatiaľ čo VFR lety nie. Žiadny let nie je predmetom letového povolenia. [2]

Horizontálne rozdelenie vzdušného priestoru:

- **Riadená oblasť (CTA)** – ide o časť vzdušného priestoru, v ktorej sú lety pod kontrolou riadiacich letovej prevádzky.
- **Koncová riadená oblasť (TMA)** – vzdušný priestor nachádzajúci sa v okolí letiska, určený na riadenie a zabezpečenie bezpečného priletu a odletu lietadiel.
- **Riadený okrsok letiska (CTR)** – priestor tesne priliehajúci k letisku, kde sa riadi letová prevádzka, pohyb lietadiel na letiskovom okruhu a v jeho blízkosti, ako aj proces vzletov a pristátí.
- **Neriadený vzdušný priestor** je oblasť, v ktorej letová činnosť podlieha len základným pravidlám a predpisom, pričom nie sú vydávané inštrukcie riadenia letovej prevádzky. Na Slovensku je tento priestor definovaný od úrovne zeme do nadmorskej výšky 8 000 stôp, s výnimkou oblastí okolo letísk s CTR alebo TMA, kde je pred letom vhodné overiť aktuálne letiskové mapy. Pri letoch do zahraničia sa odporúča skontrolovať konkrétne parametre neriadených priestorov, keďže sa môžu v jednotlivých krajinách líšiť. [2]

Rozdelenie podľa obmedzení

- **Nebezpečný vzdušný priestor (LZD – Danger)** – oblasť, v ktorej môže byť letová činnosť riziková, avšak nie je výslovné zakázaná.
- **Zakázaný vzdušný priestor (LZP – Prohibited)** – vzdušný priestor, do ktorého je vstup pre lietadlá zakázaný. Niektoré zakázané priestory sú však definované len do určitej výšky, čo umožňuje ich preletenie vo vyšších hladinách.
- **Obmedzený vzdušný priestor (LZR – Restricted)** – letová činnosť v tomto priestore je možná len za špecifických podmienok.
- **Dočasne rezervovaný vzdušný priestor (LZTRA – Temporary Reserved Airspace)** – vyhradený pre konkrétneho prevádzkovateľa, ktorý má povolenie na vykonávanie letovej činnosti. Prelet cez tento priestor môže byť povolený na základe vopred dohodnutej koordinácie.
- **Dočasne vyhradený vzdušný priestor (LZTSA – Temporary Segregated Airspace)** – určený výlučne pre vybraného prevádzkovateľa, pričom vstup ostatných lietadiel do tohto priestoru nie je povolený. [2]

V druhej časti článku bola realizovaná analýza súčasného stavu, a teda analýza spôsobov modelovania vzdušných priestorov na vybraných pracoviskách v Slovenskej republike aj v zahraničí a analýza súčasne dostupných simulačných softvérov pre riadenie letovej prevádzky. Pracoviská boli vyberané z rôznych kategórií – pracoviská, ktoré poskytujú profesionálny výcvik, výskum či vzdelávanie, ale aj pracoviská, ktoré používajú rovnaký simulačný softvér ako Katedra leteckej dopravy na Žilinskej univerzite v Žiline (ďalej len KLD). Informácie boli získané z verejne dostupných zdrojov a doplnené rozhovormi s technikmi z niektorých simulačných pracovísk. Získané údaje boli následne porovnané s aktuálnym stavom na pracovisku KLD.

2.2. ESCAPE Light na KLD

Escape Light je simulačný softvér riadenia letovej prevádzky vyvinutý spoločnosťou EUROCONTROL. Softvér ponúka realistické prostredie riadenia letovej prevádzky v reálnom čase a zároveň aj funkcionality, ktoré majú riadiaci letovej prevádzky v praxi k dispozícii. Je určený na simulácie systému tratí (En-route), a koncových riadených oblastí (ďalej len TMA). Od roku 2019 sa spoločnosť EUROCONTROL rozhodla, že svoj softvér ESCAPE vo verzii Light poskytnú bezplatne univerzitám a výskumným inštitúciám v Európe a v Ázii. Verzia Light je odľahčená, ale stále vysoko výkonná verzia softvéru ESCAPE. Táto verzia je prispôbená na prevádzku na menej výkonných počítačoch – notebookoch, ktoré môžu byť voliteľne doplnené o externé obrazovky. Počet simulovaných sektorov je limitovaný len počtom pripojených notebookov.

Simulátor zaznamenáva veľké množstvo údajov, vrátane interakcií medzi riadiacimi a pilotmi, bezpečnostných upozornení, pohybov lietadiel a ich trajektórií. Tieto údaje sú následne k dispozícii na spracovanie po skončení cvičenia, či už na štatistickú analýzu, výcvik alebo výskumné účely. Simulátor preto môže byť použitý na výskum, simulácie, ako aj na základný výcvik riadenia letovej prevádzky pre študentov letectva. [3,4]



Obrázok 1: ESCAPE Light na KLD

Escape Light je navrhnutý na fungovanie v prostredí operačného systému Linux. Na KLD sú počítače vybavené operačným systémom Windows. Na zabezpečenie kompatibility a možnosti spúšťania simulátora je využívaný softvér Oracle VirtualBox, ktorý umožňuje vytvoriť a spravovať virtuálne stroje. V tomto virtuálnom prostredí je nainštalovaný Linux distribúcie CentOS, ktorý je známy svojou stabilitou a širokým využitím v

serverových a simulačných aplikáciách. Tento prístup umožňuje spúšťať Escape Light na počítačoch s Windows, pričom zachováva všetky funkcie a vlastnosti simulátora bez potreby fyzickej inštalácie Linuxu.

Víziou KLD je, aby simulátor Escape Light simuloval stanovisko riadenia letovej prevádzky „Žilina veža“ na medzinárodnom letisku Žilina. To zahŕňa riadený okrsok letiska CTR a TMA žilinského vzdušného priestoru. KLD chce týmto poskytnúť svojim študentom možnosť nazrieť do sveta riadenia letovej prevádzky vo vzdušnom priestore, ktorý je im blízky, a s ktorým už majú skúsenosti.

2.3. Oslovené simulačné pracoviská

S cieľom získať ucelený prehľad o úrovni a využití simulačných pracovísk na výcvik a vzdelávanie v oblasti riadenia letovej prevádzky, boli oslovené viaceré slovenské aj zahraničné inštitúcie, ktoré pracujú so simulátormi ATC.

- a) **Výcvikové stredisko Letových prevádzkových služieb Slovenskej republiky (LPS SR)** využíva simulačné softvéry LETVIS a Eurocat 2000. Zameriava sa na výcvik profesionálnych riadiacich letovej prevádzky, pričom poskytuje aj pokračujúce vzdelávanie pre aktuálne zamestnaných riadiacich. [5,6]
- b) **České vysoké učení technické v Prahe (ČVUT)** prevádzkuje simulátor ESCAPE Light, ktorý je prepojený s výučbou v rámci študijných programov. Zameriava sa najmä na radarové simulácie a spolupracuje s medzinárodnými partnermi vrátane Eurocontrolu. [7]
- c) **Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika** využíva radarový simulátor LETVIS, ktorý slúži na kvalifikačný výcvik vojenských riadiacich. Hoci nie je bežne prepojený s výučbou študentov akadémie, poskytuje praktický výcvik pre profesionálov ozbrojených síl. [8,11]
- d) **Technická univerzita v Košiciach (TUKE)** disponuje radarovým aj vežovým simulátorom. Softvér LETVIS sa využíva v rámci výučby ako súčasť predmetov a študenti si na ňom osvojujú praktické zručnosti radarového riadenia. [9,12]
- e) **Czech Air Navigation Institute (CANI)** je výcviková organizácia, ktorá pripravuje budúcich riadiacich letovej prevádzky v Českej republike. Využíva moderné simulačné technológie a poskytuje komplexný výcvik vrátane radarového aj procedurálneho riadenia. CANI používa radarový aj vežový simulátor – radarové simulátory od spoločností CS Soft a ROSE Simulation, a vežový simulátor od Adacel. Výcvik prebieha na 28 pozíciách pre riadiacich letovej prevádzky a 27 pozíciách pre pseudopilotov, čo umožňuje realistickú a efektívnu simuláciu rôznych operačných scenárov. [10,13]

Získané informácie umožnili porovnať úroveň vybavenia, využitie simulátorov vo výučbe a kapacity jednotlivých pracovísk, čím sa vytvoril relevantný základ pre zhodnotenie

aktuálneho stavu a potenciálu rozvoja nášho simulačného prostredia.

Súčasne bola spracovaná analýza simulačných softvérov zameraných na radarové simulácie. Na základe získaných poznatkov boli definované dve skupiny požiadaviek – na model vzdušného priestoru a na technické a didaktické predpoklady jeho využitia vo výučbe.

2.4. Sformulované požiadavky na výučbu

- a) **Realistická simulácia vzdušného priestoru** – simulátor by mal umožniť presnú reprezentáciu vzdušného priestoru vrátane letových hladín, sektorov riadenia, zón s obmedzením (napr. TMA, CTR, zakázané a nebezpečné zóny) a navigačných bodov. Model musí byť schopný zachytiť nielen geografické rozloženie vzdušného priestoru, ale aj jeho špecifické dynamické prvky, ako sú procedúry vzletu, priblíženia a pristátia.
- b) **Demonštrácia základných princípov ATC** – jednoduchá ukážka základných prvkov riadenia letovej prevádzky, ako sú komunikácia medzi riadiacim a pilotom, sledovanie lietadiel na radarových obrazovkách, pridelovanie letových hladín a riešenie konfliktov.
- c) **Flexibilita scenárov a nastavenie simulácie** – simulátor by mal umožňovať tvorbu a úpravu výukových scenárov. Scenáre by mali zahŕňať rôzne cvičenia, ktoré simulujú rôzne prevádzkové situácie a zohľadňovať odlišné úrovne zručností študentov. Nastavenie simulácie je vhodné pre pokrytie širokého spektra výukových potrieb, od základných konceptov až po pokročilé situácie.
- d) **Intuitívne užívateľské rozhranie** – pre efektívne používanie simulátora počas výučby je dôležité, aby bol jeho ovládací panel intuitívny a užívateľsky prístupný. Študenti aj vyučujúci musia byť schopní jednoducho navigovať v prostredí simulátora, nastavovať parametre simulácie a analyzovať výsledky. Užívateľské rozhranie by malo byť jednoduché, s jasnými vizualizáciami a návodmi na použitie.
- e) **Odolnosť voči technickým poruchám** – simulátor musí byť stabilný a odolný voči technickým problémom, ktoré by mohli narušiť priebeh výučby. Na pokrytie tejto požiadavky by mal byť prístupný kontakt na kvalifikovanú technickú podporu.
- f) **Možnosť simulácie rôznych pozícií** – simulátor by mal umožniť študentom vyskúšať si rôzne pozície, napríklad pozíciu riadiaceho letovej prevádzky alebo pseudopilota. Tým získajú lepší obraz o vzájomnej interakcii a procesoch.
- g) **Využitelnosť pri výučbe všeobecnej leteckej teórie** – simulátor by mal byť prispôsobený na demonštráciu všeobecných pojmov, ako sú vzdušné priestory, navigácia, plánovanie letov alebo význam koordinácie v letectve.

- h) **Vyškolený inštruktor** – k zefektívneniu výučby by napomohla prítomnosť kvalifikovaného inštruktora, ktorý má znalosti z oblasti riadenia letovej prevádzky a zároveň rozumie technickým možnostiam a nastaveniam simulátora Escape Light. Takýto odborník dokáže nielen správne vysvetliť teoretické princípy, ale aj prakticky predviesť použitie simulátora, prispôbiť scenáre potrebám výučby a efektívne vyhodnotiť výkon študentov. Schopnosť inštruktora poskytovať konštruktívnu spätnú väzbu a analyzovať rozhodnutia študentov je kľúčová pre ich odborný rast.
- i) **Technické vybavenie simulátora.** Dokonalý simulátor by mal byť vybavený profesionálnymi prvkami, ako sú konzoly, výnosom meteorologického radaru, telefónne linky na koordináciu medzi sektormi so systémom VCS. Dôležitým aspektom je aj fyzické oddelenie pracovných pozícií riadiacich a pseudopilotov, čím sa predchádza rušivým vplyvom a zachováva sa štandardná rádiová komunikácia podobná reálnej prevádzke. Čím je vybavenie simulátora prepracovanejšie a vernejšie realite, tým vyššia je aj kvalita a prínos samotnej simulácie

2.5. Sformulované požiadavky na model vzdušného priestoru

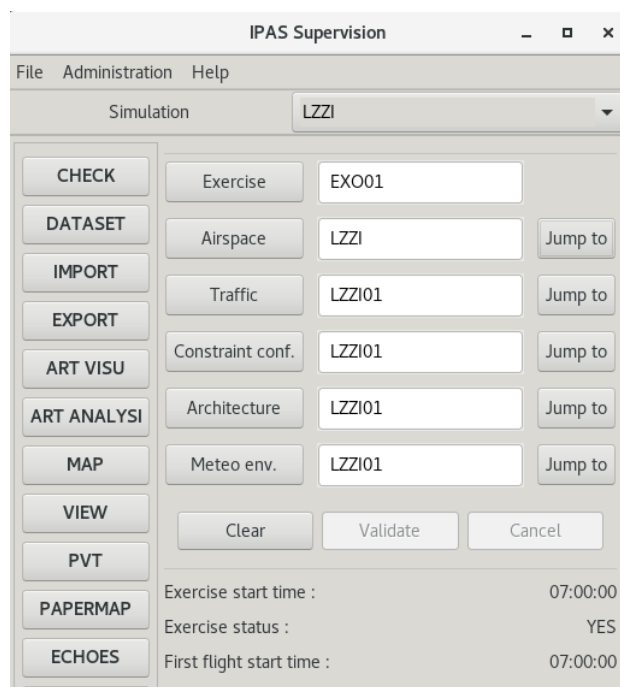
- a) **Model by sa mal nachádzať v správnej geografickej lokalite.** To znamená, že keď modelujeme vzdušný priestor letiska Žilina, letisko Žilina sa bude nachádzať medzi hranicami tohto priestoru. Priestor by mal mať tvar čo najviac zodpovedajúci realite.
- b) **Model by mal obsahovať všetky navigačné body v simulovanom priestore a jeho okolí.** Navigačné body pre lety VFR ale aj body pre lety za pravidiel IFR. Body sú dôležité pre navigovanie letov a slúžia aj ako pozície na miznutie a objavovanie nových letov, ktoré majú preletieť, alebo už preleteli simulovaným vzdušným priestorom.
- c) **Model by mal zahŕňať odletové a príletové trasy patriace k letisku Žilina.** Zabezpečujú organizovaný, bezpečný a efektívny tok letovej prevádzky v okolí letiska. Ich presná simulácia umožní študentom pochopiť a nacvičovať štandardné postupy, ktoré sa používajú v praxi.
- d) **Model by mal mať realistický tvar.** Konkrétne riadená oblasť by mala mať čo najpresnejší tvar identický s realitou, aby bolo jednoznačné, kedy letecká prevádzka už zasahuje do riadeného priestoru.
- e) **Správny kontrast farieb.** Farby by mali byť navrhnuté tak, aby boli dobre rozlíšiteľné, no zároveň vizuálne príjemné a nenamáhali oči. Keďže riadiaci letovej prevádzky trávajú pri monitore dlhý čas, vhodné je používať tlmené a tmavšie odtiene, ktoré znižujú únavu očí a prispievajú k lepšiemu sústredeniu. Správne zvolená farebná schéma tak podporí nielen estetiku, ale aj funkčnosť modelu.

- f) **Filtrovanie zobrazovaných údajov.** Možnosť zapnúť alebo vypnúť prvky ako navigačné body, ich označenia, príletové a odletové trate či predĺženú os dráhy prispieva k prehľadnosti a efektívnosti práce. Riadiaci letovej prevádzky alebo študenti pracujúci so simulátorom tak môžu sústrediť svoju pozornosť len na tie informácie, ktoré sú v danom momente relevantné. Táto flexibilita zníži vizuálne zaťaženie a pomôže predchádzať zbytočnému zahlteniu obrazovky údajmi.
- g) **Použitie správnych symbolov.** Pre navigačné body je vhodné, aby boli rozlíšiteľné ich typy. Napríklad povinne hlásny vstupno-výstupný VFR bod do CTR by mal mať výraznejší symbol (napríklad plný trojuholník) ako nejaký RNAV bod, ktorý je súčasťou SID či STAR.

Model vzdušného priestoru v simulátore ESCAPE Light bol vytváraný postupne. Jeho tvorba bola v spolupráci so simulátorovým špecialistom z EUROCONTROLU – Philippe Bouchaudonom. Poskytol nám potrebné zaškolenie na prostredie simulátora. Postupnými krokmi sme sa dostávali ku zložitejším procesom až do bodu, kedy sme boli sami schopní modelovať vlastný priestor. Počas modelovania vzdušného priestoru letiska Žilina sme dbali na stanovené požiadavky na samotný model a aj na požiadavky pre výučbu.

2.6. Modelovanie v prostredí Escape Light

Escape Light má dva virtuálne stroje - IPAS a GROUND. IPAS menu, na obrázku 2, slúži na vykonávanie zmien v simulácii. GROUND slúži na spúšťanie simulácie.



Obrázok 2: IPAS

IPAS predstavuje hlavné menu, z ktorého sa simulácia upravuje. Každá zmena v databáze musí byť potvrdená (commit), skontrolovaná (check) a následne prenesená (deliver) do simulácie, teda do GROUND virtuálneho stroja (RunTIME). Až po splnení týchto krokov sa zmena naozaj prejaví. Avšak IPAS má

zakomponované nástroje ECHOES (pre zmeny máp) a ARTVISU (pre zmeny v stavbe vzdušného priestoru), vďaka ktorým je možné vizuálne skontrolovať vykonané zmeny ešte pred tým, ako sa odošlú do GROUND virtuálneho stroja.

Airspace databáza. Otvorí sa po kliknutí na „Jump to“ v riadku Airspace. Slúži na tvorbu navigačných bodov, ktoré sa budú zobrazovať na obrazovke riadiaceho. Taktiež, ako názov napovedá, sa v nej zriaďujú všetky prvky vzdušného priestoru ako sú: letiská, navigačné body, letové cesty, SID, STAR, vyčkávacie obrazce, objemy vzdušných priestorov, stanovišťa ATC a riadené sektory.

Graphical data databáza. Otvorí sa po kliknutí na „File - Open - Graphical data“. Slúži na vytváranie bodov, ktoré sa nezobrazujú na obrazovke riadiaceho. Tieto body slúžia na konštrukciu grafických útvarov. Pomocou týchto bodov sa dajú vytvoriť: čiary, plochy, kružnice, pravítko či doplnkové informácie.

V rámci modelovania vzdušného priestoru letiska Žilina sa nám podarilo vytvoriť:

- 2 sektory a 2 ATC stanovišťa
- znázornenie letiska, dráhy a predĺženej osi dráhy
- potrebné navigačné body
- leteckú prevádzku
- odletové a priletové trate
- vyznačenie CTR/TMA/ATZ
- doplnkové údaje

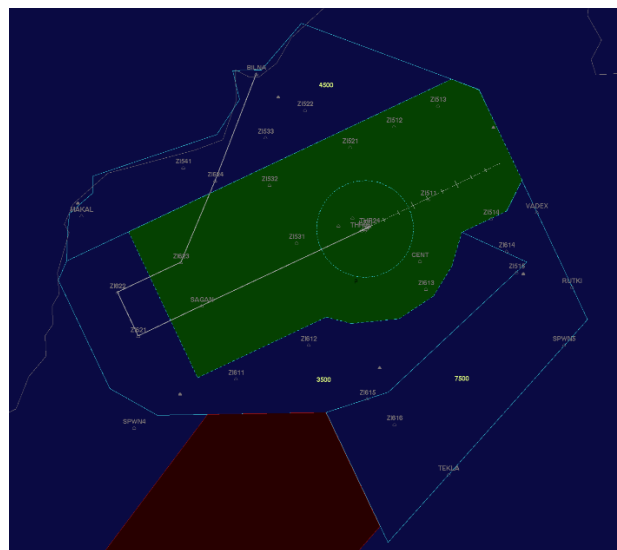
Na záver sme doladili kontrast farieb. Pre každý vytvorený prvok sme vybrali farbu, ktorá kontrastuje s jej okolím, aby všetky prvky vynikli a zároveň pohľad na obrazovku bol príjemný pre oči. Tento proces sa nazýva Konfigurácia máp.

3. Výsledky

Analýza súčasného stavu simulátorových pracovísk a dostupných softvérových riešení pre simulácie riadenia letovej prevádzky poukázala na rôzne zlepšenia, ktorými sa môže naše pracovisko na KLD inšpirovať. Je to najmä vďaka zisteniu, že ostatné pracoviská sú o niekoľko krokov ďalej vo svojej činnosti. Ich simulátory už sú implementované do výučbového procesu alebo sa používajú na prípravu študentov na skutočný výcvik. Majú vytvorené funkčné cvičenia a rôzne vzdušné priestory. Majú zvyčajne vytvorený tím ľudí, ktorý sa o simulátor stará a zabezpečuje jeho činnosť. Vybavenie simulátorov taktiež zodpovedá úrovni pracoviska.

V druhej časti práce, na základe stanovených požiadaviek, bol vytvorený model vzdušného priestoru letiska Žilina v prostredí simulátora ESCAPE Light. Následne bolo vyhodnotené, že tento model spĺňa všetky stanovené požiadavky na vzdušný priestor, čo ho robí pripraveným na vytváranie výučbových cvičení. Model sa nachádza v správnej geografickej lokalite, obsahuje všetky potrebné navigačné body, zahŕňa trasy SID a STAR, má realistický tvar, má správne nastavený kontrast farieb na základe inšpirácie z reálneho pohľadu na monitor riadiaceho letovej prevádzky, má intuitívne nastavené filtrovanie zobrazovaných

údajov a model využíva správne symboly pre rozlíšenie jednotlivých typov bodov.



Obrázok 3 Vytvorený model vzdušného priestoru letiska Žilina

4. Záver

Cieľom článku bolo analyzovať spôsoby modelovania vzdušných priestorov na pracoviskách simulátorov riadenia letovej prevádzky v Slovenskej republike a v zahraničí, a zároveň vytvoriť model vzdušného priestoru letiska Žilina v prostredí simulátora ESCAPE Light. Tento model má byť určený na výučbu a demonštráciu pre študentov študijného programu Letecká doprava na Katedre leteckej dopravy Žilinskej univerzity v Žiline.

V rámci analýzy zahraničných aj domácich pracovísk sa podarilo získať cenné poznatky o organizačných, technických a obsahových aspektoch výučby s použitím simulátorov. Zistilo sa, že úspešné pracoviská na univerzitnej úrovni často fungujú vďaka aktívnej komunite nadšencov, spolupráci so špecialistami z praxe a dôkladne pripraveným výukovým scenárom. Tieto zistenia predstavujú užitočnú inšpiráciu pre ďalší rozvoj simulačného pracoviska na Žilinskej univerzite.

Z praktického hľadiska sa podarilo úspešne vytvoriť model vzdušného priestoru letiska Žilina v prostredí simulátora ESCAPE Light. Model je plne funkčný, s optimalizovaným výberom zobrazovaných údajov, pripravený na využitie pri tvorbe výukových cvičení a môže významne prispieť k zrozumiteľnejšiemu prenosu poznatkov o princípoch riadenia letovej prevádzky.

Aj keď sa podarilo naplniť stanovené ciele, počas práce sa objavili oblasti, ktorých riešenie je vhodné pre ďalšie články – napríklad tvorba komplexných výukových scenárov, systematické zaškolenie personálu či rozšírenie využitia simulátora v rámci viacerých predmetov. Budúci rozvoj simulátora môže zároveň vytvoriť priestor na spoluprácu s leteckými školami, výcvikovými organizáciami alebo výskumnými inštitúciami, čo by mohlo prispieť k ešte efektívnejšiemu využitiu tejto technológie v oblasti vzdelávania a výskumu.

Pod'akovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 54ŽU-4/2025 "Možnosti využitia umelej inteligencie v študijnom programe letecká doprava pri výučbe pilotov a technikov údržby. (SmartSkyEdu)"

Referencie

- [1] **Slov-lex.** Zákon č. 143/1998 Z. z. o civilnom letectve. [online]. Dostupné z: <https://www.slovlex.sk/ezbierkyfe/pravnepredpisy/SK/ZZ/1998/143/20200801#paragraf-2.pismo-a> [Cit. 12. 1. 2025].
- [2] **Airliners.sk.** Vzdušný priestor – rozdelenie, základné charakteristiky. [online]. Dostupné z: <https://www.airliners.sk/vzdusny-priestor-rozdelenie-zakladne-charakteristiky/> [Cit. 12. 1. 2025].
- [3] **EUROCONTROL.** ESCAPE – Air Traffic Control Simulator. [online]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/simulator/escape> [Cit. 16. 1. 2025].
- [4] **EUROCONTROL.** ESCAPE Light Simulátor – ukážka cvičenia. [video online]. YouTube, 2023. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=VhkdM47-w7c> [Cit. 16. 1. 2025].
- [5] **LPS SR.** Radarový simulátor. [online]. Dostupné z: <https://www.lps.sk/sk/sluzby/vs/simulatory/radarovy-simulator> [Cit. 13. 3. 2025].
- [6] **Rozhovor s technikom simulátora LPS SR.** Osobný rozhovor, 15. 3. 2025.
- [7] **Rozhovor s inštruktorom simulátora ČVUT.** Osobný rozhovor, 17. 4. 2025.
- [8] **Akadémia ozbrojených síl SR.** Simulačné centrum – Riadenie letovej prevádzky. [online]. Dostupné z: <https://aos.sk/clanok/simulacne-centrum-riadenie-letovej-prevadzky> [Cit. 16. 4. 2025].
- [9] **TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH.** Vedecko-výskumné pracoviská LF. [online]. Dostupné z: <https://lf.tuke.sk/wps/portal/lf/veda-a-vyskum/vedecko-vyskumne-pracoviska> [Cit. 14. 4. 2025].
- [10] **CANI.** About Us – Czech Air Navigation Institute. [online]. Dostupné z: <https://www.cani.cz/aboutus/introduction> [Cit. 3. 4. 2025].
- [11] **Rozhovor s inštruktorom Simulačného centra AOS.** 23. 4. 2025
- [12] **Rozhovor s doktorandom Katedry letovej prípravy TUKE.** 23. 4. 2025
- [13] **Komunikácia s vedúcim simulačného oddelenia CANI.** 24. 4. 2025



REALIZÁCIA A NASTAVENIE MECHANIZMU RIADENIA PRE LIETADLO STRATON D7

Jakub Weinfortner
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The article is focused on the design and optimization of the control system of the ultralight aircraft Straton D7 "mini" with the aim of improving its flight performance during low-altitude flight. The main topics included the application of drag-inducing mechanization, the design of alternative control methods, and the use of modern composite materials in the production of control components. The theoretical part of the thesis presented an overview of aircraft control systems and analyzed individual control elements. In the practical part, a spoiler mechanism was designed, its functionality was tested, and the entire control system was adjusted. Furthermore, an alternative method of ground control using a tailwheel undercarriage was developed. The thesis also examined the possibilities of using composite materials for the production of control surfaces and Push rods, as well as the potential placement of aerodynamic trim tabs on V tail surfaces. The outcomes of the thesis represent an innovative approach to the design of the Straton D7 control system in the context of modern amateur aviation requirements.

Keywords

Flight controls ,spoiler mechanism ,control system,

1. Úvod

Hlavným cieľom práce je realizácia a nastavenie systému riadenia pre lietadlo Straton D7. Súčasťou práce je analýza originálneho systému riadenia za pomoci pôvodných návrhov ktorá slúžila pre návrh modernizovaných systémov riadenia. Pre praktickú časť práce bolo potrebné rozpoznať problémy v pôvodnom návrhu lietadla. Praktická časť sa zaoberá riešením nájdenej problematiky riadenia lietadla Straton D7. Riešenie na problému pri riadení lietadla pri zemi bolo vyriešené návrhom a implementáciou spojlerov na krídle. Navrhnuté riešenia boli podrobené overeniu funkčnosti za pomoci využitia digitálnych technológií a simulačných programov. Praktická časť práce zahŕňa riešenie pri pohybe na zemi za pomoci navrhnutého ostrohoého podvozku. Moderný prístup pri použití materiálov bol navrhnutý pre výrobu prvkov riadenia. Tejto časti práce sú popísané možnosti zníženia hmotnosti lietadla pri využití kompozitných materiálov v systéme riadenia lietadla . Táto práca sa zameriava aj na kompletizáciu a nastavenie riadenia primárnych riadiacich plôch. V praktickej časti je riešená možnosť vyváženia chvostových motýlikových plôch.

2. Lietadlo Straton D7

Jedno z prvých ultraľhkých aerodynamicky riadených letúnov ktorý získal typový preukaz LAA. Typ D-7 Straton mini je konštrukciou Ing. Oldricha Olšanského CSc.

D-7 je jednomiestny vzperový hornoplošník s krídlom nadsadeným nad trupom. Pohonná jednotka je v tlačnom usporiadaní na odtokovej hrane krídla. Krídlo je celodrevené, jednonosíkové s torznou skriňou v tvare písmena D. Torzná skriňa s nábežnou hranou sú tvorené z leteckej preglejky v zadnej časti je krídlo potiahnuté plátnom. Trup v prednej časti tvorí sklolaminátová škrupina vystužená preglejkovým

rebovaním. v zadnej časti je trup tvorený pološkrupinovou konštrukciou ktorá je tvorená z preglejky v podobe rúry s konštantným kruhovým prierezom. Smerové a výškové kormidlo je združené do motýlikových riadiacich plôch ktoré sú drevenej konštrukcie. Niektoré amatérske stavby už disponujú aerodynamickou brzdou alebo rušičmi vztlaku na krídle. Podvozok je v prevažnej miere tvorený jedným hlavným pojazdom kolesom, ktoré je umiestnené pod krídlom v laminátovej pološkrupine a bočnými pomocnými kolesami. Firma TORRESI vyvinula verziu so zdvojeným hlavným podvozkom na kompozitných pružinách. Pre pohonnú jednotku sa prevažne používal automobilový motor Trabant bez reduktora, ale niektoré verzie disponovali pohonnou jednotkou firmy Hirth alebo Rotax 447. Letún je prevažne vyrábaný amatérsky podľa výkresov, ktoré bolo možné dostať od firmy TORRESI .[1], [2], [3], [4], [5], [6]

Letún sa vyznačuje malou hmotnosťou, ku ktorej odpovedajú aj dobré výkony a nízke referenčné rýchlosti. Vďaka použitiu motora Trabant má letún pomerne nízku spotrebu ktorá sa pohybuje medzi 3-4 l/h. Letún má dobrú ovládateľnosť a dostatočnú stabilitu. Je vhodný na aeroturistiku, lietanie v termike alebo na rekreačné lietanie. Tento letún bol taktiež vyvezený do mnohých krajín, kde sa montoval s plechovým krídlom (USA).[3], [4]



Obrázok 1 Lietadlo Straton D7

Zdroj [4]

3. Metodika a metódy skúmania

Hlavným zdrojom informácií použitých pri spracovaní tejto bakalárskej práce bola literatúra vo forme :

- Návodov a manuálov
- Odborných príspevkov
- Knižných zdrojov
- Internetových zdrojov

Pri vypracovaní práce boli použité rôzne logické metódy za pomoci ktorých bolo možné dosiahnuť stanovené ciele práce.

Metóda zberu a spracovania informácií bola v tejto práci uplatnená v dvoch oblastiach. V prvej oblasti bola metóda zberu a spracovania informácií použitá pre zber informácií z dostupnej literatúry o systémoch riadenia lietadiel ako aj o jednotlivých prvkoch riadenia lietadiel. V druhej oblasti bola táto metóda využitá pri zhromažďovaní informácií o lietadle Straton D7 „mini“. Pri zhromažďovaní informácií o lietadle táto metóda umožnila autorovi priblížiť problematiku samotného lietadla a niektorých jeho častí. Vďaka tejto metóde bolo možné získať dostatočné množstvo informácií ktoré umožnili postupovať autorovi v návrhovej činnosti pre riešenia niektorých problematík samotného lietadla.

Metóda analýzy bola v tejto práci použitá na viacerých úrovniach. Najprv bolo potrebné analyzovať systém riadenia a funkčnosť aktuálnych komponentov riadenia .Použitie analýzy bolo potrebné aj pri bližšej špecifikácii nedostatkov v systéme riadenia lietadla za pomoci čoho bolo zistené nedostatky ako absencia prostriedkov na zníženie odporu lietadla ,absencia riadiaceho ostroho podvozku ako aj možné zníženie hmotnosti riadiacich prvkov za pomoci použitia moderných materiálov. Metóda analýzy bola použitá aj pri návrhovej činnosti autora kedy bolo potrebné analyzovať vhodné umiestnenie rušičov vzlaku ako aj samotný tvar sekundárnych riadiacich plôch a ich vplyv na letové vlastnosti lietadla.

Metóda komparácie bola v tejto práci využitá pri viacerých úrovniach práce. Jednou z hlavných oblastí kde bola využitá

metóda komparácie bola oblasť kde bolo nutné porovnať pôvodný návrh krídla bez odporovej mechanizácie a návrhy s rôznou odporovou mechanizáciou čo umožnilo získať ucelený pohľad na vec autorovi a zvoliť vhodnú odporovú mechanizáciu. Metóda komparácie bola použitá aj pri návrhovej činnosti kde bolo potrebné porovnať jednotlivé mechanické prvky odporovej mechanizácie pri iných typoch lietadiel. Metóda komparácie bola využívaná aj pri menších oblastiach ako voľba vhodného materiálu pre optimalizovaný systém riadenia lietadla .

Metóda syntézy bola použitá pri návrhovej činnosti autora . Na základe analýzy bolo potrebné navrhnuť systém riadenia sekundárnych plôch. Bolo potrebné aplikovať poznatky získané pri analýze do návrhovej činnosti pri navrhovaní sekundárnych riadiacich plôch ktorými boli rušiče vzlaku. Syntéza bola využitá pri spájaní originálnych prvkov krídla a navrhnutých častí ktoré umožňujú umiestnenie a využitie navrhnutých rušičov vzlaku .

Ďalej bola syntéza použitá pri realizácii návrhu vyvažovacích plôšok kedy bolo potrebné zjednotiť funkčnosť kombinovaných kormidiel a funkciu vyvažovanej plôšky tak aby nedochádzalo k nepriaznivým vedľajším efektom.

4. Praktická realizácia a overenie funkčnosti

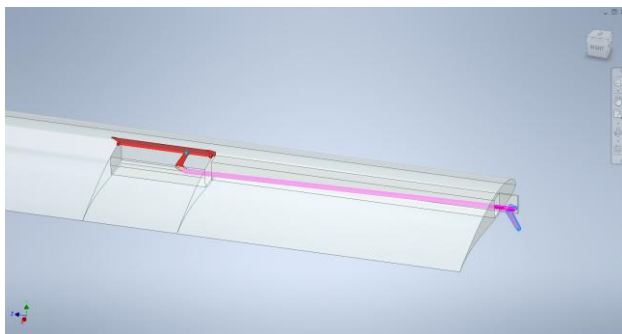
4.1. Návrhová činnosť

4.1.1. Návrh Spojlerov

Pre potreby zníženia množstva vzlaku generovaného prízemným efektom bolo potrebné navrhnuť odporovú mechanizáciu. Odporová mechanizácia bola navrhnutá vo forme spojlerov umiestnených na sacej strane krídla. Návrhy boli vykonané v softwareovom programe Autodesk inventor kde boli nakreslené. Pre plne pohyblivý model spojleru bolo potrebné vytvoriť sadu komponentov ktoré boli vytvorené podobne ako spojler v mierke 1:1 .

4.1.2. Odklápací spojler

Odklápací spojler bol navrhnutý na základe pozorovania a analýzy designov na iných konštrukciách lietadiel . Spojler s nachádza na sacej strane profilu blízko koreňovej časti krídla . Konštrukcia spojleru je pripevnená k nosníku za pomoci otočného závesu . K spojleru je pripevnený posúvač ktorý sa nachádza na integrovanej oske na spojleri tento posúvač umožňuje premeniť otočný pohyb páky na odklopný. Páka je pripevnená k nosníku v spodnej časti , k páke je pripevnené ťažko ktoré vedie ťahtou vytvorenou za nosníkom a rebrovaním krídla. Ťažko je spojené z pákovým mechanizmom pripojeným na koreň krídla. Pákový mechanizmus na koreni krídla je prepojený z systémom riadenia a postrannou riadiacou pákou.

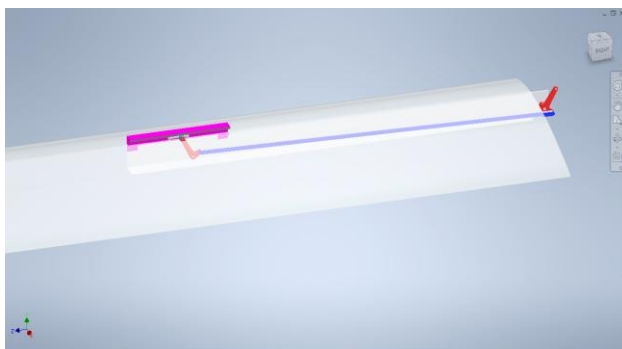


Obrázok 2 Odklopny spojler s mechanizáciou

Zdroj (autor)

4.1.3. Výsuvný spojler

Výsuvný spojler je inšpirovaný rušičmi vzlaku používanými na ultraľahkých lietadlách a klzákoch. Spojler sa skladá z doskovitého telesa ktoré v zatvorenom stave ostáva zasunuté v šachte za nosníkom. Na spojleri sa nachádza integrovaná os na ktorej sa nachádza posuvné zariadenie. Toto posuvné zariadenie umožňuje pohyb do vysunutej Polohy. Posuvný pohyb je umožnený premenou otočného pohybu za pomoci páky ktorá je umiestnená na nosníku. Pák na nosníku je spojená z pákou v koreňovej časti krídla za pomoci tiahla čo umožňuje prenos sily z riadenia na spojler.

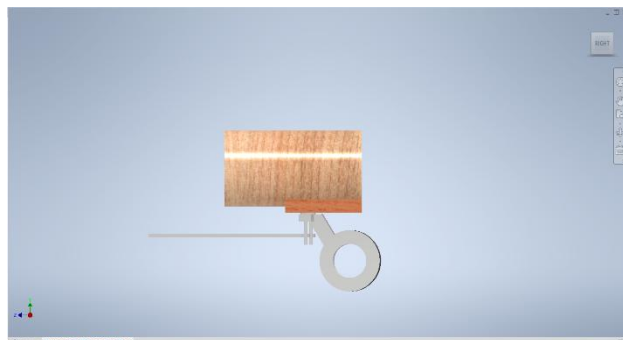


Obrázok 3 Výsuvný spojler s mechanizáciou

Zdroj (autor)

4.1.4. Systém riadenia ostrohového podvozku

Pre potreby riadenia lietadla na zemi bez pomoci asistenta bol navrhnutý ostrohový podvozok možnosťou riadenia. Systém riadenia ostrohového podvozku nahrádza pôvodný podvozok. Navrhovaný podvozok sa skladá z otočného závesu podvozku ktorý je ukotvený k chvostovému nosníku lietadla. Na otočný záves je možné umiestniť záves kolesa a koleso na osi. Pre možnosť riadenia je na každú stranu otočného závesu pridané malé tiahlo. Na toto tiahlo sa pripája lano. Lano je možné viesť chvostovým nosníkom alebo ho pripevniť na spodnú časť nosníku za pomoci bowdenu a pripevňovacích skrutiek. Lano je vstupuje do trupovej časti kde je pripevnené na váhadlo nožného riadenia ktoré je spojené z pedálmi a príslušnými lanami.

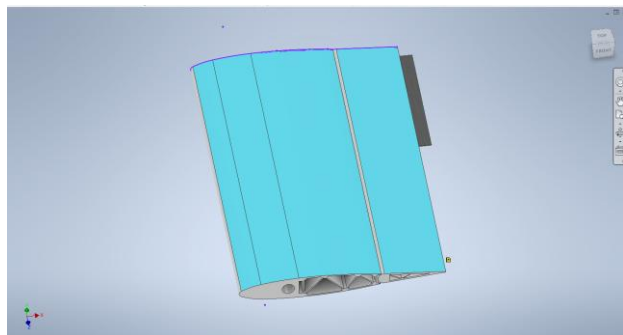


Obrázok 4 Návrh riadietlného ostrohového podvozku

Zdroj (Autor)

4.1.5. Aerodynamické vyváženie

Pre zlepšenie letových vlastností a zjednodušenie pilotáže bol navrhnutý systém aerodynamického vyváženia. Aerodynamické vyváženie umožňuje vyvážiť lietadlo ktoré môže vďaka modifikáciám byť ťažké na nos alebo chvost. Vyvažovacia plocha bola umiestnená na koreňovú časť zmiešaného kormidla lietadla straton D7 pre dosiahnutie lepších výsledkov je odporúčané použiť dve vyvažovacie plochy. Plocha je nastaviteľná na zemi.



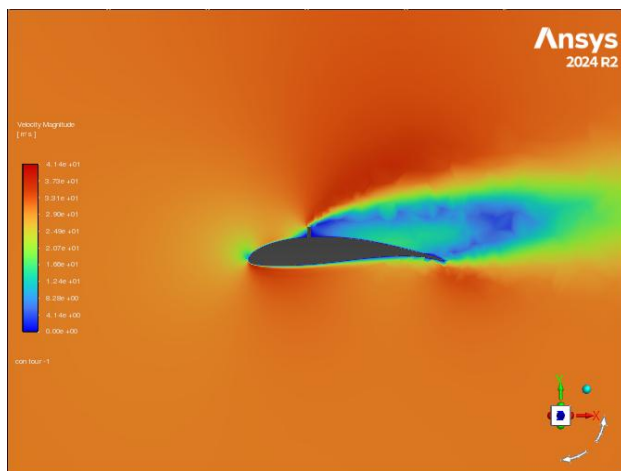
Obrázok 5 Návrh umiestnenia vyvažovacej plochy na kormidlo

Zdroj (Autor)

4.2. Overenie funkčnosti

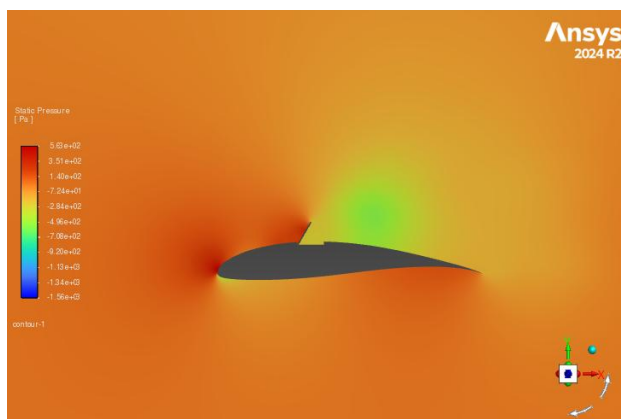
Overenie funkcie návrhov bolo vykonané pri návrhu spojlerov. Overenie funkčnosti spočívalo v zostavení komponentov jednotlivých návrhov a test pohybovej funkčnosti. Pre overenie aerodynamických vlastností spojlerov boli návrhy podrobené CFD analýze v simulačnom programe Ansys. Pre účel tejto práce boli merania vykonané na modeloch v mierke 1:10 vzhľadom na svoju simulačnú zložitnosť. Pre simuláciu sme zvolili veľkosť meshu s minimálnou hodnotou 0,0001mm a maximálnou 0,05mm. CFD analýza bola vykonaná pre každý návrh ako aj pre krídlo bez sekundárnych plôch na troch rýchlostiach. Ako rýchlosti boli zvolené 110 km/h čo je najvyššia neprekročiteľná rýchlosť, 85 km/h ako cestovná rýchlosť a 53 km/h ako pádová rýchlosť. Simulácie boli vykonané v 100 iteráciách s nastavenou medznou vrstvou v počte 20. Výsledky CFD Analýzy boli spracované v numerických hodnotách do tabuľky a graficky kde boli pozorované jednotlivé aspekty a parametre krídla.

Parametre ktoré boli pozorované pri tejto analýze boli veľkosť a intenzita rozloženia rýchlosti prúdu vzduchu ako aj rozloženie tlaku na krídle.



Obrázok 6 Rozloženie rýchlosti na výsuvnom spojleri

Zdroj Autor



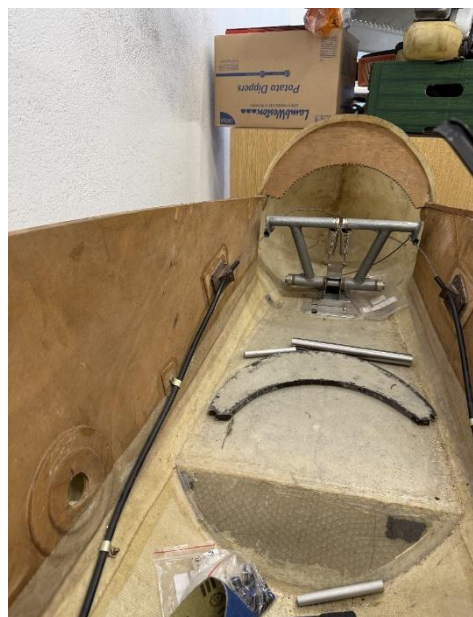
Obrázok 7 Rozloženie tlaku pre krídlo s odklopným spojlerom

Zdroj (Autor)

4.3. Inštalácia nožného riadenia

Riadenie sme zostavili podľa stavebného výkresu. Naše riadenie sa skladá z tiahel uložených v klzných puzdách chvostového nosníka a lanového prevodu z nožného riadenia. Mechanizmus nožného riadenia je spriahnutý s mechanizmom pákového riadenia nakoľko ide o kombinované chvostové plochy. Začali sme výrobou tiahel v chvostovej časti. Dokopy sme potrebovali 2 tiahla. Tie som vyrobil z duralovej trubky s priemerom (10 mm). Tieto tiahla som na jednej strane zakončil nastaviteľným vidlicovým zakončením na ktoré som nasadil nosovú poistnú podložku. Druhú stranu som zakončil záslepkou ktorú som uložil z presahom do rúrky. Záslepku som vyrobil z teflonového valca ktorý som za pomoci trieskového obrábania na sústruhu opracoval na požadovaný pomer. Po opracovaní som záslepku za pomoci gumeného kladiva a drevenej podložky nalisoval do trubky. Po osadení záslepky som vyvŕtal diery do trubky s priemerom 5 mm. Vyvŕtaný otvor som odihliľ za pomoci

valcového ihlového pilníka. Tento postup som vykonal aj pre druhú rúrku. Ďalší postup som smeroval na inštaláciu vahadlového systému riadenia do trupu. Tento systém má za úlohu syntézou pohybov riadiacej páky a nožného riadenia vychýlenie výkonných členov. Na spodnú stranu chvostového nosníka pred priehradou som vyvŕtal diery podľa stavebného výkresu. Diery sme z druhej strany opatрили závitovým lôžkom ktoré sme pomocou epoxidového lepidla prilepili k nosníku. Z pomoci svorníkov sme pripievnili vahadlo zo spodnej strany nosníka. Nad hornú stranu nosníka sme do priehtady za sedadlom a druhej v poradí v osi trupu vyvŕtali otvory do ktorých sme umiestnili teflonové puzdra a nasledovnej trubku priemeru (10mm). Na rúrku sme umiestnili konzolu ovládania z duralovej pásovinu. Na zahnuté strany sme pripievnili za pomoci svorníkov na jednej strane 2 tiahla narezané na predpísanú dĺžku. Tieto tiahla sme opatril na koncoch taktiež teflonovou záslepkou uloženou s presahom. Po dokončení tohto procesu som sa pustil do výroby tiahel nožného riadenia. Jednalo sa o 2 menšie tiahla ktoré som vyrobil z duralovej trubky. Z stavebného výkresu som odčítal rozmer z trubky za pomoci pítky na železo skrátil na požadovaný pomer. Odrezanú stranu som opracoval za pomoci pilníka. Na zakončenie tohto tiahla som podľa výkresu použil výklopne a výklopne nastaviteľné puzdro. Do trubky som vyvŕtal na každý koniec 2 diery kolmé na os trubky a vzájomne posunuté o 90° . Prevratne uloženie puzdra a trubky som spojil za pomoci nitovania. Zvolil som nit s pologulatou hlavou. Tento postup som zopakoval aj pre druhé tiahlo. Tiahla som následne inštaloval do trupu spolu s vahadlami. Ako ďalšie som si zvolil výrobu a inštaláciu lán nožného riadenia. Lano som pretiahol bowdenom ktorý som pripievnil na vnútornú stranu trupu. Jednu stranu lana som vybavil dreveným zakončením a druhu nastaviteľným zakončením vyrobeným zo svorníku a podložiek pre dočasné zriadenie riadenia. Ďalej som na predom naznačené miesto nainštaloval pedále nožného riadenia. Na pedále som potom osadil pružiny pre vytvorenie vratnej sily v riadení.



Obrázok 8 Pohľad na nožné riadenie počas inštalácie

Zdroj (Autor)

5. Záver

V závere práce je možné zhodnotiť, že ciele práce boli dosiahnuté. Po Analýze výsledkov simulácie obtekania na navrhovaných rušičoch vztaku bol pri oboch návrhoch dosiahnutý pozitívny výsledok. Pri výsuvnej verzii spojleru bol dosiahnutý najväčší odpor. Pri odklopnom variante bol dosiahnutý odpor nižšej hodnoty ako pri výsuvnom ale dochádza k značnému ovplyvneniu vztaku na krídle. Cieľ nastavenia a kompletizácie riadenia lietadla bol dosiahnutý len čiastočne kedy bol nastavený systém riadenia zmiešaných motýlikových plôch. Nastavenie priečného riadenia nebolo vykonané vzhľadom na skutočnosť, že v čase realizácie práce nebol skompletizovaný nosník krídla. Táto skutočnosť zabránila práci na konštrukcii a nastavení priečného riadenia lietadla. Menšie ciele v práci boli dosiahnuté v podobe zníženia hmotnosti lietadla, ktorá je pre tento typ konštrukcie významná. Zníženie hmotnosti bolo dosiahnuté za pomoci návrhu využitia kompozitných materiálov na výrobu riadiacich plôch ale aj jednotlivých komponentov riadenia. Veľkosť úspory hmotnosti je variabilná a závisí od množstva použitých kompozitných komponentov. Je možné povedať, že cieľ optimalizácie riadenia na zemi bol dosiahnutý návrhom riaditeľného ostrohového podvozku. Pre správnu funkciu tohto návrhu je však potrebné vybaviť lietadlo zdvojeným hlavným podvozkom. Cieľ aerodynamického vyváženia bol dosiahnutý za pomoci navrhnutia vyvažovacej plôšky pre zmiešané kormidlo. Pre správnu funkciu tohto návrhu je potrebné inštalovať dve vyvažovacie plôšky na kormidla chvostových plôch. Týmto vyvážením sme získali pomerne lacné riešenie pre vyváženie lietadla, ktoré môže byť nestabilné vďaka nesprávnemu postupu pri výrobe alebo iným okolnostiam.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

- [1] O. Olšanský, „Dokumentácia k Stavbe lietadla Straton D7 mini“.
- [2] „OSEMDESIATY ŠTVRTÝ DIEL FOTOPOHĽADOV DO HISTÓRIE LETISKA KOŠICE: ULTRAĽAHKÝ STRATON D-7“, Letisko Košice. Videno: 22. duben 2025. [Online]. Dostupné z: <https://www.airportkosice.sk/sk/pre-cestujucich/aktuality/osemdesiaty-stvrtty-diel-fotopohladov-do-historie-letiska-kosice>
- [3] „Straton D7“, *letectví*.
- [4] F. servis [www full-net cz]; e-mail: info@full-net.cz a inzerent, „Prodám Straton D7 mini“, AEROHANGÁR. Videno: 27. duben 2025. [Online]. Dostupné z: <https://www.aerohangar.cz/ultralight/ultralehka-letadla/prodam-straton-d7-mini/>

- [5] ČTK, „Loňský pád letadla u Chocně způsobila technická závada“, Blesk.cz. Videno: 22. duben 2025. [Online]. Dostupné z: <https://www.blesk.cz/clanek/zpravy-live-ekonomika/494749/lonsky-pad-letadla-u-chocne-zpusobila-technicka-zavada.html>

- [6] „ProFe D-8 Moby Dick“, *Wikipedia*. 2. červenec 2024. Videno: 22. duben 2025. [Online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=ProFe_D-8_Moby_Dick&oldid=1232282830



VYUŽITIE UAV PRE MONITOROVANIE A ÚDRŽBU LETISKOVEJ INFRAŠTRUKTÚRY

Vladyslava Levchenko
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Robert Dianovský
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to explore the possibility of implementing UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) in the inspection and maintenance of airport infrastructure. The thesis focuses on identifying the most suitable areas in airport operations for UAV deployment and compares their advantages over traditional methods. Within this analysis, the technological capabilities of UAVs, their sensor equipment, and legal aspects of operation are examined in detail. Their application in airport operations and evaluation of implementation efficiency and cost-effectiveness are also investigated. In the practical part, a comparative analysis of two inspection approaches and methods for evaluating the effectiveness of UAV implementation into operations was used. For areas with the highest suitability for UAV deployment, a detailed methodology for their implementation was developed. The results of the thesis show that drones can significantly increase efficiency and safety in performing inspections, especially in areas with extensive and time-consuming operations. UAV implementation also brings economic benefits, such as reduced maintenance costs and limited disruption to airport operations. The conclusions of the thesis suggest that the optimal approach to UAV deployment in airport operations lies in their gradual integration in combination with traditional methods, leading to optimal results in terms of efficiency, safety, and costs.

Keywords

UAV. Unmanned Aerial Vehicles. Airport infrastructure. Monitoring. Inspection. Implementation. Sensors. Efficiency.

1. Úvod

V súčasnosti sa kladie čoraz väčší dôraz na efektivitu a bezpečnosť prevádzky letísk, pričom infraštruktúra letiska priamo ovplyvňuje bezpečnosť, plynulosť služieb a ekonomickú efektivitu. Tradičné manuálne inšpekcie sú časovo náročné, vyžadujú veľa ľudských zdrojov a môžu narušiť prevádzku letiska. Moderné technológie, ako bezpilotné letecké prostriedky (UAV), bežne označované ako drony, predstavujú technológiu s významným potenciálom pre monitorovanie infraštruktúry vďaka rýchlemu nasadeniu, manévrovateľnosti a zberu detailných údajov, ale ich implementácia na letisku sa stretáva s prísnyimi bezpečnostnými a legislatívnymi požiadavkami. Téma je aktuálna kvôli rastúcemu tlaku na zvyšovanie efektivity prevádzky, znižovanie nákladov a minimalizovanie rušenia letovej prevádzky.

Cieľom práce je zhodnotiť potenciál UAV pre monitorovanie a údržbu letiskovej infraštruktúry, identifikovať oblasti s najväčšími výhodami a navrhnúť metodiku ich implementácie. V rámci metodologického prístupu bola využitá porovnávacia analýza tradičných metód inšpekcie s modernými prístupmi založenými na využití UAV. Významným zdrojom informácií boli odborné zdroje, technická dokumentácia výrobcov dronov a prípadové štúdie z letísk, kde sa už využívajú UAV technológie. Legislatívny rámec EASA slúži ako základ pre hodnotenie realizovateľnosti navrhovaných riešení.

Štruktúra práce prechádza od teoretických základov k praktickým aplikáciám. Po úvode nasleduje teoretický prehľad UAV technológií, právneho rámca, tradičných metód inšpekcie a príklady úspešného nasadenia UAV na letiskách. Práca sa zameriava na analýzu vhodnosti dronov pre rôzne oblasti infraštruktúry a porovnáva tradičné a UAV riešenia z hľadiska

účinnosti a nákladovej efektívnosti. Záver obsahuje návrh metodiky na implementáciu UAV do letiskových procesov.

Výsledky práce môžu prispieť k optimalizácii procesov monitorovania a údržby infraštruktúry, zvýšiť bezpečnosť, znížiť náklady a minimalizovať prerušenia letiskovej prevádzky.

2. Teoretický rámec a technológia UAV systémov a ich právne a bezpečnostné aspekty v leteckej infraštruktúre

Kapitola sa zameria na využitie UAV pri monitorovaní letiskovej infraštruktúry, vrátane ich technických charakteristík, senzorov a právnych aspektov prevádzky. Tieto informácie tvoria základ pre návrhy implementácie UAV v monitorovaní a údržbe letísk.

2.1. Základná charakteristika UAV systémov

Unmanned Aerial Vehicles (UAV), známe aj ako bezpilotné lietajúce prostriedky alebo drony, sú technologické zariadenia, ktoré vykonávajú úlohy bez potreby prítomnosti pilota na palube, s možnosťou riadenia cez automatizované systémy alebo operátorom na zemi. **Unmanned Aircraft System (UAS)** je širší pojem, ktorý zahŕňa nielen samotný UAV, ale aj pozemný riadiaci systém na zemi a komunikačný systém. Typy UAV sa líšia podľa veľkosti (malé, stredné, veľké) a konštrukcie (multikoptéry, pevné krídla, hybridné UAV), pričom každý typ má špecifické výhody, napríklad manévrovateľnosť alebo dolet. [1]

2.2. Typy UAV

Existujú tri hlavné typy dronov, ktoré sa líšia spôsobom pohybu a prevádzky: **UAV s pevným krídlom**: Podobné lietadlám,

schopné pokryť veľké územia (viac ako 100 km), dosahujú rýchlosť 150-250 km/h, ideálne na inšpekciu vzletových a pristávacích dráh; **Multikoptéry**: Najpopulárnejšie, majú viacero rotorov, schopné vznášať sa na mieste, dosah 15-50 km, ideálne na detailné inšpekcie v obmedzených priestoroch; **Hybridné UAV**: Kombinujú výhody multikoptér a UAV s pevným krídlom, sú schopné vertikálneho vzletu a horizontálneho letu. [2]

2.3. Používané senzory a technológie

Súčasný UAV sú vybavené rôznymi senzormi a technológiami, ktoré umožňujú vykonávať detailné inšpekcie letísk s vysokou presnosťou a efektívnosťou: **Kamery s vysokým rozlíšením** – nástroj na detailnú vizuálnu kontrolu, ktorý umožňuje identifikovať poškodenia na VPD a kontrolovať stav terminálov, osvetlenia a technických zariadení; **LiDAR** – technológia na vytváranie presných 3D modelov povrchu s vysokou presnosťou, účinná aj pri zníženej viditeľnosti; **Termovízne kamery** identifikujú tepelné anomálie v infraštruktúre, pomáhajú identifikovať prehriate komponenty a závady; **Spektrálna analýza** - využíva rôzne vlnové dĺžky svetla na získanie informácií o objektoch a povrchoch. [3]

2.4. Softvérové riešenia pre spracovanie dát

Softvér na spracovanie obrazov je nevyhnutný pre analýzu snímok a dát získaných zo senzorov, ako sú kamery s vysokým rozlíšením a LiDAR.

Na spracovanie obrazových dát a tvorbu 2D a 3D modelov sa využívajú programy *Pix4D*, *Agisoft Metashape*, *Autodesk ReCap*, a *FLIR Tools* na analýzu termálnych snímok. Analýza dát v reálnom čase a spracovanie výsledkov: *Skycatch*, *DJI Terra*, *Honeywell Forge* a *GIS*. [4]

2.5. Právne a bezpečnostné aspekty prevádzky UAV na letiskách

Prevádzka UAV na letiskách je regulovaná prísnyimi normami EÚ a národnými predpismi, ktoré zabezpečujú bezpečnosť, ochranu osôb a prevenciu nelegálneho využitia vzdušného priestoru, pričom zabezpečujú kompatibilitu UAV operácií s inými lietadlami a infraštruktúrou letísk.

EASA (Agentúra pre bezpečnosť letectva EÚ) rozdeľuje operácie do troch kategórií podľa rizika: otvorená, špecifická a certifikovaná kategória. Pre každú kategóriu sú stanovené špecifické požiadavky na povolenia a certifikáciu. Existujú aj geografické zóny UAS okolo letísk, ktoré obmedzujú alebo zakazujú let dronov a vyžadujú povolenie príslušného úradu. **Slovenská národná legislatíva**: V Slovenskej republike musia operátori UAV dodržiavať predpisy EASA a národné legislatívne požiadavky, ktoré zahŕňajú registráciu operátora UAV, vykonávanie teoretickej skúšky, dodržiavanie geografických obmedzení a poistenie zodpovednosti. Prevádzka UAV je regulovaná *Zákomom o civilnom letectve* a vyhláškami Dopravného úradu SR.

Bezpečnostné opatrenia zahŕňajú povolenie od prevádzkovateľa letiska, koordináciu s ATC, dodržiavanie geografických obmedzení, školenie a certifikáciu operátorov, poistenie, poveternostné obmedzenia a obmedzenia vzletovej

hmotnosti. UAV musia byť vybavené systémami na prevenciu kolízií a detekciu prekážok. [5]

3. Súčasný stav v oblasti inšpekcie letiskovej infraštruktúry

Inšpekcia letiskovej infraštruktúry je kľúčová pre bezpečnosť a efektívnosť leteckej prevádzky. Táto kapitola sa zameria na súčasný stav inšpekcie letiskovej infraštruktúry, konkrétne na tradičné metódy inšpekcie a inovatívne riešenia, ako je využívanie dronov na letiskách po celom svete.

3.1. Tradičné metódy kontroly a údržby letiskovej infraštruktúry

Tradičné metódy zahŕňajú manuálne kontroly, využitie špeciálnych pozemných vozidiel a rôznych diagnostických zariadení. Inšpektori vykonávajú vizuálne kontroly, pričom sa zameriavajú na trhliny, praskliny a cudzie predmety (FOD) na **vzletovo-pristávacích dráhach**. Kontroly sa vykonávajú minimálne raz denne, spravidla pred začiatkom prevádzky, v súlade s predpismi ICAO.

Meranie svietivosti a kalibrácia svetelných systémov zahŕňa overenie funkčnosti zariadení ako PAPI, ALS, MALS a ďalších. Rutinné kontroly sa vykonávajú denne (trvajú 20–40 minút), komplexná kalibrácia sa vykonáva každé 3–6 mesiacov.

Kontrola a kalibrácia rádionavigačných prostriedkov zahŕňa ILS, VOR, DME a radarové systémy. Frekvencia týchto kontrol podľa *ICAO Doc 8071* je nasledovná: ILS – každých 60–180 dní (v závislosti od kategórie), VOR a DME – každých 365 dní. Kontroly sa vykonávajú pomocou letových meraní vykonávaných špeciálne vybavenými lietadlami a pozemných meraní so špecializovanými prístrojmi na testovanie rádiových signálov a prijímačov presných navigačných signálov.

Inšpekcia budov letiska zahŕňa kontrolu všetkých kľúčových technických systémov, ako sú klimatizačné, vykurovacie a osvetľovacie systémy, ako aj bezpečnostné systémy. Inšpekcie podľa ICAO zahŕňajú denné vizuálne kontroly, týždenné kontroly bezpečnosti, mesačné hodnotenie systémov, štvrtročné kontroly infraštruktúry a ročné komplexné hodnotenie technického stavu a súladu s predpismi. Frekvencia týchto kontrol závisí od typu zariadení a špecifických požiadaviek.

Monitorovanie životného prostredia zahŕňa nepretržité sledovanie meteorologických podmienok, kvality ovzdušia, emisií, odpadových vôd a ďalších parametrov. METAR správy sa vydávajú každú hodinu, pričom pravidelné kontroly environmentálnych parametrov sa vykonávajú podľa stanovených intervalov. [6] [7]

3.2. Príklady nasadenia UAV na svetových letiskách

Globálne skúsenosti ukazujú, že UAV sú efektívnym nástrojom na zlepšenie bezpečnosti a efektívnosti letiskových operácií. Ich implementácia rieši výzvy moderných letísk, poskytuje efektívne riešenia na monitorovanie prevádzky, bezpečnostné kontroly a údržbu infraštruktúry. Rôzne letiská už začali využívať UAV na inšpekciu dráh a hodnotenie bezpečnostných rizík. Príklady:

1. **Dubai International Airport (DXB):** Jedno z prvých letísk používajúcich UAV na monitorovanie dráh. Drony s pokročilými kamerovými systémami detegujú trhliny, nečistoty a iné nezrovnalosti na povrchu a umožňujú okamžitú analýzu.

2. **Heathrow Airport (Londýn):** Drony s LiDAR senzormi vykonávajú rýchle inšpekcie dráh a infraštruktúry a znižujú čas potrebný na kontroly dráh o 30%.

3. **Changi Airport (Singapur):** Od 2018 používa "Drone Operations and Management System" na kontrolu dráh, detekciu FOD, inšpekciu svetelných systémov a monitorovanie technických systémov. Výsledok: 40% zníženie času na detekciu FOD. [8]

4. **Schiphol Airport (Amsterdam):** Od 2020 implementuje UAV systém na kontrolu dráh, navigačných systémov a monitorovanie kvality ovzdušia.

5. **Incheon International Airport (Južná Kórea):** V 2020 zaviedol systém "Smart Airport Drone System" s autonómnymi dronmi pre 24-hodinové inšpekcie perimetra. Výsledok: 37% zlepšenie v detekcii neoprávnených vniknutí.

4. Možnosti nasadenia UAV v jednotlivých oblastiach

Využitie UAV na letiskách má potenciál stať sa kľúčovým nástrojom na monitorovanie, údržbu a zlepšenie bezpečnosti, najmä na veľkých letiskách, kde môžu byť využívané na rôzne úlohy. Drony výrazne zvyšujú efektívnosť, presnosť a rýchlosť operácií v oblasti letiskovej infraštruktúry. Táto kapitola sa zameria na aplikácie UAV v kľúčových oblastiach letiskových operácií, ktoré budú predmetom ďalšieho výskumu s cieľom určiť optimálne oblasti ich využitia a prínosy, ako aj stanoviť, kde bude nasadenie bezpilotných lietadiel najefektívnejšie. Nasledujúce oblasti predstavujú kľúčové možnosti ich implementácie:

4.1. Inšpekcia vzletovo-pristávacích dráh (VPD)

Jedným z najbežnejších spôsobov využitia UAV na letiskách je monitorovanie stavu vzletovo-pristávacích dráh, ktoré sú kľúčové pre bezpečnú prevádzku. Drony umožňujú presné a rýchle kontroly povrchu dráh, detekciu cudzích predmetov (FOD), poškodení povrchu a termovízne snímanie.

UAV s vysokorozlišovacími kamerami a LiDAR systémami poskytujú presné 3D modely povrchu dráhy a detegujú výškové rozdiely v mm. Algoritmy strojového učenia dokážu identifikovať cudzie predmety v reálnom čase s presnosťou vyššou než 95%. Termovízne kamery dokážu detegovať tepelné anomálie v dráhových materiáloch, indikujúce prehrievanie, poškodenia alebo štrukturálne oslabenie.

Tento prístup prináša výhody, ako sú eliminácia uzatvárania dráh, zníženie prevádzkových prestojov a odstránenie subjektívnych faktorov ľudskej kontroly, čím sa výrazne zvyšuje konzistentnosť, spoľahlivosť výsledkov a bezpečnosť. [9]

4.2. Kontrola a kalibrácia dráhových svetiel

Využitie UAV na monitorovanie a kalibráciu svetelných systémov predstavuje inovatívny prístup. UAV nasadené na tento účel sú vybavené fotometrickými senzormi, spektrometrami a

termovíznymi kamerami, ktoré dokážu merať svetivosť, analyzovať chromatické vlastnosti, kontrolovať smerovanie lúčov, detegovať poškodené jednotky a identifikovať tepelné vyžarovanie s citlivosťou 0,05°C pre detekciu technických problémov. Využívanie **RTK GNSS technológie** zaručuje vysokú presnosť polohovania UAV a presne definované trajektórie simulujúce približovanie lietadla, čím sa zabezpečí správne meranie svetelných systémov v súlade s normami ICAO Annex 14 a s použitím kalibračných postupov podľa normy ISO/IEC 17025.

Tento prístup ponúka výhody, ako je časová efektivita, vyššia presnosť a komplexnejšie údaje, a tiež eliminuje potrebu uzatvárania dráhy, čím zvyšuje bezpečnosť a efektivitu letiskovej prevádzky. [10]

4.3. Kontrola a kalibrácia rádionavigačných prostriedkov

Nasadenie UAV na kalibráciu predstavuje inovatívny prístup a efektívnu alternatívu tradičným metódam, ktorý sa v posledných rokoch aktívne rozvíja. UAV platformy vybavené špecializovanými zariadeniami umožňujú presné meranie ILS, VOR a DME systémov, pričom zabezpečujú vysokú presnosť signálov a vytvárajú detailné 3D mapy pokrytia a intenzity signálov s vysokým rozlíšením.

4.3.1. Technické riešenia pre kalibráciu rôznych navigačných systémov

- ILS kalibrácia: UAV vykonáva lety cez lokalizér a vertikálne lety cez glide path, merajúci presnosť signálov, simulované približovacie manévry s presnosťou 0,01 stupňa.

- VOR kalibrácia: UAV vykonáva radiálne a kruhové lety, overujúci presnosť smerových informácií.

- DME kalibrácia: UAV vykonáva radiálne merania vzdialenosti a kruhové lety okolo DME zariadenia na overenie konzistentnosti merania.

Tieto technológie boli už testované na letiskách ako **Uljanovsk-Vostočnyj** v Rusku a **Norimberg** v Nemecku, kde výsledky ukázali, že UAV merania dosahujú presnosť porovnateľnú s tradičnými kalibráciami, pričom náklady sú nižšie až o 60 % a čas sa skrátil z 3-4 hodín (ako pri tradičnej metóde) na 90 minút. V budúcnosti sa predpokladá širšie využitie UAV na tento účel, ale v súčasnosti tieto technológie stále majú určité obmedzenia, preto sa letiská zatiaľ len začínajú snažiť implementovať túto metódu do svojej infraštruktúry. [11]

4.4. Monitorovanie životného prostredia

Na letiskách, kde sú environmentálne podmienky kritické, môžu UAV poskytnúť efektívne riešenie pre komplexný monitoring. Tradičné metódy, ako stacionárne stanice, poskytujú obmedzené pokrytie a nezachytávajú dynamické zmeny. UAV predstavujú mobilné a flexibilné riešenie, ktoré tieto obmedzenia prekonávajú.

UAV vybavené špeciálnymi senzormi umožňujú monitorovanie kvality ovzdušia, mapovanie šírenia emisií, identifikáciu zdrojov znečistenia, meranie hluku, a monitoring znečistenia vody

a pôdy, čo zlepšuje environmentálny reporting a optimalizuje prevádzku. UAV vybavené meteorologickými senzormi umožňujú merania teploty, vlhkosti, tlaku, vertikálnych profilov vetra, detekciu teplotných inverzií a turbulencií.

Integrované riešenia umožňujú automatizované merania s nízkymi nákladmi, ktoré slúžia na environmentálny reporting, optimalizáciu letiskovej prevádzky a na zníženie negatívnych dopadov na životné prostredie. [12]

4.5. Inšpekcia budov a technologických celkov

UAV predstavujú efektívnu alternatívu s výraznými výhodami oproti tradičným metódam, ktoré sú časovo náročné a často vyžadujú špeciálne vybavenie.

UAV umožňujú rýchlu kontrolu strešných plôch, fasád, riadiacich veží a ďalších vysokých konštrukcií, čím sa zvyšuje bezpečnosť personálu a znižujú náklady. UAV vybavené kvalitnou optikou dokážu identifikovať poškodenia hydroizolácie, miesta hromadenia vody a poruchy odvodňovacích systémov na strechách bez potreby fyzického prístupu. Tieto technológie sa stále vyvíjajú, ale už teraz ukazujú obrovský potenciál na optimalizáciu procesov na letiskách. Napríklad letisko **Charlesa de Gaulla** v Paríži dosiahlo 40% úsporu času pri inšpekciách pomocou UAV.

Technológie UAV na letiskách zvyšujú efektívnosť, bezpečnosť a znižujú prevádzkové náklady. Ich implementácia sa stále vyvíja, pričom ďalší výskum určí najlepšie oblasti na ich využitie. [13]

5. Porovnávací analýza vhodnosti UAV pre jednotlivé aplikácie

V tejto kapitole bude vykonané komplexné porovnanie tradičných metód a využitia UAV technológií v jednotlivých oblastiach letiskovej údržby a monitoringu. Cieľom tejto analýzy je vyhodnotiť, v ktorých oblastiach budú UAV najefektívnejším nástrojom na implementáciu a v ktorých naopak neefektívnym alebo nevhodným riešením.

5.1. Metodika hodnotenia

Na porovnanie tradičných metód a UAV technológií bola vypracovaná hodnotiaci metodika založená na kľúčových kritériách, ktoré sa hodnotia na škále 1-5 (1 = nevhodné, 5 = veľmi efektívne). Pre komplexné porovnanie boli stanovené hodnotiace kritériá, ktoré sú uvedené v tabuľke 1. Celkové hodnotenie vhodnosti sa vypočíta ako aritmetický priemer bodov zo všetkých kritérií. Na základe toho sa každá metóda hodnotí v rozmedzí od „veľmi vysokej“ po „veľmi nízku“.

4,5 - 5,0: Veľmi vysoké – výrazne lepšia alternatíva

3,5 - 4,4: Vysoké – významné výhody oproti tradičným metódam

2,5 - 3,4: Stredné – vhodná alternatíva s výhradami

1,5 - 2,4: Nízke – obmedzené využitie, prevažujú nevýhody

1,0 - 1,4: Veľmi nízke – nevhodná alternatíva

Pre každú analyzovanú oblasť bude vypracovaná tabuľková analýza obsahujúca popis tradičnej metódy, popis UAV alternatívy, porovnanie podľa kritérií, výhody a nevýhody oboch

prístupov a slovné vyhodnotenie výsledkov. Hodnotenie kritérií bude vychádzať predovšetkým z údajov uvedených v predchádzajúcich kapitolách práce, konkrétne z technických špecifikácií UAV systémov, príkladov ich využitia na letiskách, ekonomických analýz, expertných hodnotení a odbornej literatúry.

Tabuľka 1: Kritériá pre komplexné porovnanie UAV technológií a tradičných metód v letiskových operáciách, zdroj (autor)

Kritérium	Popis	Najvyššie hodnotenie (5)	Stredné hodnotenie (3)	Najnižšie hodnotenie (1)
Časová efektívnosť	Časová náročnosť inšpekcie	>70% úspora času	Porovnateľný čas	Výrazne dlhší čas
Nákladová efektívnosť	Celkové náklady na implementáciu a prevádzku	Významné zníženie (>50% úspora)	Porovnateľné náklady	Výrazne vyššie náklady
Kvalita dát	Presnosť, detailnosť a spoľahlivosť informácií	Výrazne kvalitnejšie dáta	Porovnateľná kvalita	Nízka kvalita dát
Bezpečnosť	Miera rizika pre personál a prevádzku	Výrazne zvýšená bezpečnosť	Porovnateľná bezpečnosť	Zvýšené bezpečnostné riziko
Regulačná komplexnosť	Legislatívne a regulačné prekážky	Minimálne prekážky	Stredná úroveň regulácií	Vysoká regulačná komplexnosť
Flexibilita nasadenia	Schopnosť rýchleho nasadenia a prispôbenia sa rôznym podmienkam	Vysoká flexibilita	Priemerná flexibilita	Nízka flexibilita
Technická náročnosť	Zložitosť obsluhy a kvalifikácia personálu	Nízka náročnosť	Stredná náročnosť	Vysoká náročnosť

5.2. VÝSLEDKY HODNOTENIA JEDNOTLIVÝCH OBLASTÍ

5.2.1. Kontrola povrchu dráh

Tabuľka 2: Porovnávanie tradičnej metódy a UAV riešenia pri kontrole povrchu dráh, zdroj (autor)

Kritérium	Tradičná metóda	UAV riešenie
Popis	Manuálna inšpekcia vozidlom, pešo	UAV s vysokorozlíšovacími kamerami, termálnymi senzormi a LiDAR
Počet potrebných pracovníkov	3-4	1-2
Čas potrebný na podrobnú inšpekciu štandardnej dráhy (3000m x 45m)	2-4 hodiny	2-2,5 hodiny
Čas potrebný na dennú vizuálnu kontrolu	30 minút – 2 hodiny	1-2 hodiny
Schopnosť detekcie trhlín (minimálna šírka)	2 mm	3-5 mm
Presnosť detekcie FOD objektov	95-98%	90-95%
Digitálna dokumentácia	Limitovaná (bodové fotografie)	Kompletná (3D modely, ortofotomapy)
Výhody	Vysoká presnosť detekcie; Overená metodika; Okamžitá možnosť opravy menších defektov	Rýchlosť inšpekcie (2x rýchlejšie); Vysoká presnosť detekcie; Minimálne narušenie prevádzky; Komplexná digitálna dokumentácia; Automatizovaná detekcia defektov
Nevýhody	Časová náročnosť; Potreba uzavretia dráhy; Subjektívnosť hodnotenia a ľudské chyby;	Trochu nižšia presnosť pri malých defektoch; Závislé od povetnostných podmienok; Vyššie počiatočné náklady na technológiu; Obmedzení dosah batérie;

Hodnotenie podľa kritérií ukázalo, že UAV metóda je efektívnejšia v oblasti kvality dát, bezpečnosti a flexibility

nasadenia, zatiaľ čo tradičné metódy sú lepšie v regulácii a technickej náročnosti. **Celkové hodnotenie vhodnosti:** UAV riešenie dosiahlo skóre 3,57/5, čo naznačuje stredné -vysokú vhodnosť.

UAV predstavujú vhodnú alternatívu k tradičným metódam, ale so špecifickými výhodami. Ideálnym riešením je kombinovaný prístup: UAV pre bežné inšpekcie a komplexnú dokumentáciu, a tradičné metódy pre detailnejšie kontroly v náročných podmienkach.

5.2.2. Meranie svetivosti dráhových svetiel

Tabuľka 3: Porovnanie tradičnej metódy a UAV riešenia pri meraní svetivosti dráhových svetiel, zdroj (autor)

Kritérium	Tradičná metóda	UAV riešenie
Popis	Prenosné fotometre, manuálne meranie každého svetelného bodu	UAV vybavené fotometrickými senzormi a termovíznymi kamerami, lietajúce po vopred definovaných trasách
Čas potrebný na kontrolu kompletného svetelného systému	3-4 hodiny	1,5-2,5 hodiny
Presnosť merania svetivosti	±3%	±5%
Náklady na jedno meranie kompletného systému	1500-2200 €	600-800 €
Komplexnosť údajov	Individuálne svetlá	Kompletná mapa svetivosti vrátane priestorových údajov
Frekvencia meraní v praxi	1-2x ročne	2 - 4x ročne
Detekcia porúch svetelných jednotiek	95%	92-95%
Výhody	Vysoká presnosť merania (±3%); Priama kalibrácia svetiel; Nezávislosť od poveternostných podmienok;	Rýchlosť (až 3x rýchlejšie); Komplexné mapovanie celého svetelného systému; Automatizované vyhodnotenie; Minimálne narušenie prevádzky; Vysoká presnosť;
Nevýhody	Extrémna časová náročnosť; Potreba uzavretia dráhy; Ľudský faktor; Bezpečnostné riziká pre personál;	Mierne nižšia presnosť (±5%); Závislosť od poveternostných podmienok; Vysoké počiatkové náklady na technológiu; Obmedzení dosah batérie;

Hodnotenie podľa kritérií ukázalo, že UAV metóda je efektívnejšia v časovej a nákladovej efektivite, kvalite dát, bezpečnosti a flexibilitate nasadenia. Tradičné metódy sú lepšie v regulácii a technickej náročnosti. **Celkové hodnotenie vhodnosti:** UAV riešenie dosiahlo skóre 3,85/5, čo zodpovedá vysokej vhodnosti.

UAV sú efektívnou alternatívou k tradičným metódam merania dráhových svetiel, s výhodami v časovej a ekonomickej efektivite a komplexnosti dát, ale s obmedzeniami v presnosti a v závislosti od počasia. Ideálnym prístupom je kombinácia UAV pre pravidelné kontroly a tradičných metód pre certifikačné oficiálne merania a kalibráciu problematických svetiel.

5.2.3. Kontrola a kalibrácia rádionavigačných prostriedkov

Hodnotenie podľa kritérií ukázalo, že UAV metóda je výrazne efektívnejšia v časovej a nákladovej efektivite a flexibilitate nasadenia. Tradičné metódy sú lepšie v kvalite dát a regulačnej komplexnosti. **Celkové hodnotenie vhodnosti:** UAV riešenie dosiahlo skóre 3/5, čo zodpovedá strednej vhodnosti.

UAV riešenia sú časovo a ekonomicky efektívnou alternatívou pre kalibráciu rádionavigačných systémov, s výhodami v hustote

dát a flexibilitate, ale ich vertikálny dosah, regulačné obmedzenia a presnosť vo vyšších výškach sú obmedzením. Ideálnym prístupom je kombinácia UAV pre doplnkové merania medzi oficiálnymi kalibráciami a rýchlu kontrolu, pričom tradičné metódy sú nevyhnutné pre oficiálne kalibrácie a simulácie veľkých lietadiel.

Tabuľka 4: Porovnanie tradičnej metódy kontroly a UAV riešenia na kalibráciu radionavigačných systémov, zdroj (autor)

Kritérium	Tradičná metóda	UAV riešenie
Popis	Špecializované kalibračné lietadlá s certifikovaným vybavením	UAV vybavené príslušnými vysielacími a prijímačmi rádiosignálov
Vertikálny dosah merania	Do 10 000 m	Do 400-600 m
Plánovaná frekvencia kalibrácií	1x za 6-12 mesiacov	Možnosť mesačných kontrol
Čas kompletnej kalibrácie ILS	3-4 hodiny	90 minút
Náklady na jednu kompletnú kalibráciu ILS	10 000-20 000€ (5 000-8 000 EUR za letovú hodinu)	1500-2500 €
Čas potrebný na prípravu kalibrácie	1 - 2 týždne	1-2 dni
Regulačná akceptácia výsledkov	Plne akceptované	Limitovaná akceptácia (doplnkové merania)
Hustota zberu dát (body/km²)	5-10	50-100
Výhody	Vysoká presnosť a spoľahlivosť; Certifikované postupy; Možnosť merania vo vysokých výškach; Plná medzinárodná akceptácia výsledkov;	Výrazne nižšie náklady (15-20% tradičných); Vyššia frekvencia meraní; Flexibilné nasadenie;
Nevýhody	Extrémne vysoké náklady; Nízka frekvencia meraní; Logistická náročnosť; Obmedzená dostupnosť	Nedostatočná certifikácia; Obmedzený vertikálny dosah; Nižšia presnosť vo vyšších výškach; Regulačné prekážky

5.2.4. Inšpekcia budov a technologických celkov

Pre túto oblasť bola taktiež vypracovaná tabuľka porovnania tradičných metód a riešení na báze UAV pri inšpekcii infraštruktúry, a na jej základe, s ohľadom na stanovené kritériá, hodnotenie ukázalo, že UAV metóda je výrazne efektívnejšia v časovej a nákladovej efektivite, kvalite dát, bezpečnosti pre personál a flexibilitate nasadenia. Tradičné metódy sú lepšie v regulačnej komplexnosti a technickej náročnosti. **Celkové hodnotenie vhodnosti:** UAV riešenie dosiahlo skóre 4,14/5, čo zodpovedá vysokej vhodnosti.

Toto je jedna z oblastí, kde UAV ponúkajú výrazné výhody a ich implementácia predstavuje jednoznačný prínos pre efektívnu a bezpečnú správu infraštruktúry. Dokážu vykonať inšpekciu rýchlejšie, s nižšími nákladmi, znížením rizika úrazov a kvalitnejšou dokumentáciou. Napriek obmedzeniam, ako je nemožnosť fyzického testovania a závislosť od poveternostných podmienok, ideálnym prístupom je kombinácia UAV pre komplexné kontroly a tradičných metód pre cieľené testovanie a opravy.

5.2.5. Monitorovanie životného prostredia

Pre túto oblasť bola vypracovaná tabuľka porovnania tradičných metód a riešení na báze UAV technológií pri monitorovaní životného prostredia, a na jej základe, s ohľadom na stanovené

kritériá, hodnotenie ukázalo, že UAV sú efektívnejšie v časovej a nákladovej efektivite, v kvalite dát a flexibilitě nasadenia. Tradičné metódy sú o niečo lepšie v regulačnej komplexnosti a technickej náročnosti. **Celkové hodnotenie vhodnosti:** UAV riešenie dosiahlo skóre 3,72/5, čo zodpovedá vysokej vhodnosti.

Toto hodnotenie naznačuje, že UAV majú významný potenciál v environmentálnom monitoringu, no ich kombinácia s tradičnými metódami poskytuje najlepšie výsledky a predstavuje optimálny prístup k implementácii.

5.3. Súhrnné hodnotenie vhodnosti UAV riešení

Na základe analýzy majú UAV najväčší potenciál pre nasadenie v týchto oblastiach (zoranené podľa vhodnosti):

1. Inšpekcia budov a technologických celkov (4,14/5) – vysoká vhodnosť
2. Meranie svetivosti dráhových svetiel (3,85/5) – vysoká vhodnosť
3. Monitorovanie životného prostredia (3,72/5) – vysoká vhodnosť
4. Kontrola povrchu dráh (3,57/5) – stredná vhodnosť
5. Kalibrácia rádionavigačných prostriedkov (3/5) – stredná vhodnosť

Analýza ukazuje, že vo všetkých skúmaných oblastiach predstavujú UAV technológie významný prínos k tradičným metódam, pričom optimálny prístup k ich implementácii predstavuje ich kombinácia.

Optimálna implementácia UAV zahŕňa postupné zavádzanie v oblastiach s najvyššou vhodnosťou a súčasné využívanie tradičných metód pre kritické aplikácie. Stratégia zahŕňa:

1. **Postupné zavádzanie** - tento prístup umožňuje obdobie učenia a adaptácie, testovanie, školenie personálu a minimalizáciu prevádzkových porúch.
2. **Zameranie najprv na oblasti s najvyššou hodnotou vhodnosti** (Priorita podľa vhodnosti a výhod).
3. **Súbežné zachovanie tradičných metód** - najmä pri kritických bezpečnostných aplikáciách a úradných certifikáciách.

Tento hybridný prístup ponúka výhody ako zmiernenie rizika, súlad s predpismi a hladký prechod.

Pre praktické nasadenie UAV na letiskách je potrebné zohľadniť niekoľko kľúčových faktorov, ktoré môžu obmedziť ich nasadenie, ako sú regulačný rámec, prevádzkové obmedzenia, technologické limity (výdrž batérie, dosah, odolnosť voči poveternostným podmienkam) a ekonomická návratnosť.

6. Návrh metodiky implementácie UAV do vybraných procesov v prostredí letísk

Na základe predchádzajúcej analýzy a porovnania tradičných metód inšpekcie s inšpekciami využívajúcimi bezpilotné lietadlá boli identifikované dve oblasti s najvyšším potenciálom pre implementáciu UAV v prostredí letísk:

1. Inšpekcia budov a technologických celkov
2. Meranie svetivosti dráhových svetiel

Pre každý z týchto procesov je navrhnutá konkrétna metodika implementácie, ktorá presne definuje technické parametre používaných UAV, postupnosť letových misií, spôsoby zberu a analýzy dát, a postup integrácie do existujúcich procesov letiskovej prevádzky s cieľom maximalizovať efektívnosť a presnosť vykonávaných inšpekcií.

Implementácia UAV do letiskovej prevádzky prebieha v štyroch fázach, ktoré zabezpečujú systematický prístup k zavádzaniu nových technológií do letiskového prostredia. **Prípravná fáza** zahŕňa výber vhodného typu UAV, zadefinovanie metodiky, získanie povolení od leteckého úradu a vypracovanie bezpečnostných rizík. **Pilotná fáza** spočíva v testovaní UAV v kontrolovanom prostredí mimo hlavnej prevádzky, porovnaní výsledkov s tradičnými metódami a optimalizácii letových plánov. **V implementačnej fáze** sa vytvoria štandardné operačné postupy (SOP), školenie personálu, komunikácia a integrácia do systémov správy údržby letiska (AMS) a postupné zavádzanie do bežnej prevádzky. **Monitorovacia a hodnotiacia fáza** sa zameriava na kontrolu efektívnosti, optimalizáciu procesov, zber dát a aktualizáciu podľa legislatívnych zmien.

Navrhovaná metodika implementácie UAV do inšpekcie budov a merania svetivosti dráhových svetiel predstavuje systematický prístup k transformácii tradičných postupov. Dôkladná príprava, postupná implementácia a vyhodnocovanie efektívnosti sú kľúčové pre úspešnú integráciu UAV. Implementácia UAV prinesie ekonomické výhody, zníženie nákladov a času, a zároveň zvýši kvalitu a komplexnosť dát, čo prispeje k bezpečnosti leteckej prevádzky.

7. Záver

Cieľom tejto práce bolo preskúmať možnosti implementácie UAV do procesov monitorovania a údržby letiskovej infraštruktúry, identifikovať najvhodnejšie oblasti pre ich nasadenie, porovnať výhody týchto technológií s tradičnými metódami a navrhnúť metodiku pre ich implementáciu do letiskovej infraštruktúry. Analýza vychádzala z teoretických základov UAV, senzorového vybavenia, právneho rámca a tradičných metód inšpekcie, spolu s prípadovými štúdiami zo svetových letísk. Porovnávací analýza identifikovala oblasti s najvyššou vhodnosťou pre nasadenie UAV: inšpekcia budov a technologických celkov (4,14/5), meranie svetivosti dráhových svetiel (3,85/5) a monitorovanie životného prostredia (3,72/5). Stredný potenciál vykazuje kontrola povrchu dráh (3,57/5) a kalibrácia rádionavigačných prostriedkov (3/5). Pre oblasti s najvyšším potenciálom bola navrhnutá metodika implementácie, špecifikujúca požiadavky na platformu, senzorové vybavenie, postupy letových misií a analýzu dát.

Výsledky preukázali, že UAV môžu významne prevýšiť tradičné metódy v časovej efektivite, bezpečnosti personálu a komplexnosti získaných dát. Najväčšie prínosy zahŕňajú zvýšenie bezpečnosti, redukciu času inšpekcií (o 50-70%), dlhodobé ekonomické úspory (40-60%), minimalizáciu narušenia prevádzky a lepšiu kvalitu dát. Kľúčovým zistením je, že UAV nemôžu úplne nahradiť tradičné metódy, ale optimálny prístup spočíva v ich kombinácii a postupnej integrácii. UAV sú

vynikajúce pri pravidelných kontrolách stavu, mapovaní rozsiahlych oblastí a v environmentálnom monitoringu, zatiaľ čo tradičné metódy zostávajú nezastupiteľné pri detailných kontrolách a oficiálnych certifikáciách. Tento hybridný prístup zaisťuje optimálny výsledok v efektívite, bezpečnosti a nákladoch. Implementácia čelí výzvam v reguláciách a technických obmedzeniach, ako je výdrž batérií a závislosť od počasia. Regulačný rámec EASA a národných leteckých úradov zatiaľ neposkytuje úplnú podporu pre všetky aplikácie UAV na letiskách.

Na základe analýzy odporúčam postupnú implementáciu, začínajúci oblasťami s najvyšším potenciálom, pričom tradičné metódy by sa mali zachovať pre kritické aplikácie a certifikácie. Výsledky práce prinesú praktický prínos pre modernizáciu letiskových procesov a zároveň vytvoria základ pre ďalší výskum v automatizácii letiskových operácií.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu 313011ATR9 "Výskum a vývoj využiteľnosti autonómnych lietajúcich prostriedkov v boji proti pandémie spôsobenej COVID-19".

Referencie

- [1] ICAO, „Unmanned Aircraft System (UAS) Circular 328 - AN/190,“ International Civil Aviation Organization, Montreal, 2011.
- [2] 3mx.ru, „UAV: Construction, types, areas of application,“ 3mx.ru, [Online]. Available: <https://3mx.ru/articles/bpla-konstruktsiya-tipy-sfery-primeneniya>.
- [3] F. Magdolna, „How to Choose Your First Drone,“ FlyEye, 9 December 2024. [Online]. Available: <https://www.flyeye.io/top-guides-how-to-choose-your-first-drone/>.
- [4] p. - drony.cz, „Letecké práce,“ pro - drony.cz, [Online]. Available: <https://www.pro-drony.cz/sluzby/letecke-prace/>.
- [5] E. U. A. S. A. (EASA), Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft, Official Journal of the European Union, 2019.
- [6] International Civil Aviation Organization (ICAO), Annex 14: Aerodromes, Volume I: Aerodrome Design and Operations, Montreal: ICAO.
- [7] Kentucky Transportation Cabinet, „Inspections,“ Kentucky Transportation Cabinet, 2023. [Online]. Available: https://transportation.ky.gov/Aviation/Pages/inspections.aspx?utm_source.
- [8] Civil Aviation Authority of Singapore, Implementation of Drones - Based Photometric Measurement System at Changi Airport: Technical Report, Singapore: CAAS, 2022.
- [9]

- [10] D. A. Rodriguez, „Inspection of aircrafts and airports using UAS: A review,“ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024005851#bib23>, 2024.
- [11] R. T. K. & Y. H. Wilson, Artificial Intelligence in Aerodrome Lighting System Maintenance: A Review of Current Applications and Future Possibilities., International Journal of Aviation Engineering, 2023.
- [12] Cursir, „Drones for flight inspections of navigational aids,“ Cursir, [Online]. Available: <https://cursir.com/>.
- [13] J. SIMON, Drones and environmental monitoring, Entvl.L Rep. News and Analysis, 2017.
- [14] Averroes, „Utilizing Drones For Infrastructure Inspection,“ Averroes, Januar 2025. [Online]. Available: <https://averroes.ai/blog/infrastructure-inspection-drones>.



SYSTÉM PRE MERANIE VYBRANÝCH VELIČÍN VO VETERNOM TUNELI

Kateryna Antoniuk
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Pavol Pecho
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The article focuses on the design and implementation of a system for measuring selected quantities intended for application in a wind tunnel. The theoretical part includes a detailed description of the development of a mechanical transmission system, whose task is to convert aerodynamic forces into an analog signal, which can be measured and processed using Arduino microcomputers. Another part of the work involves the development of software that subsequently processes the analog signal and converts it into a digital format. The result of this conversion is the final display of the necessary data on an external screen in the form of numbers and graphs. Significant attention is given to the calibration of scales and the correct integration of sensors for measuring flow speed, to enhance the accuracy and reliability of measuring the aerodynamic characteristics of tested objects. The output presents a functional prototype of the system and its demonstration on specific examples. The system is expected to be further used for research projects.

Keywords

Wind tunnel, Arduino, Microcomputer, Sensor, Lift, Drag

1. Úvod

Tento článok sa zameriava na návrh a realizáciu meracieho systému pre veterný tunel nachádzajúci sa na Katedre leteckej dopravy Žilinskej univerzity v Žiline. Tento veterný tunel bol doteraz využívaný predovšetkým na vizuálne sledovanie prúdenia vzduchu pomocou laseru a zadymenia. Chýbala mu však možnosť kvantitatívneho merania základných aerodynamických veličín, ako sú vztlak a odpor. A okrem toho bola potreba zlepšiť možnosti sledovania rýchlosti prúdenia vzduchu.

Hlavným cieľom práce bolo navrhnúť funkčný systém snímačov, ktorý túto nevýhodu odstráni. Riešenie zahŕňa výber a inštaláciu vhodných senzorov, návrh mechanického nosného systému, ako aj vývoj riadiaceho softvéru. Výsledkom je zariadenie, ktoré dokáže zbierať a spracovávať údaje v reálnom čase a poskytovať grafický aj číselný výstup pre analýzu aerodynamických javov.

Práca tak významne rozširuje možnosti využitia veterného tunela pri výučbe a výskume. Nový merací systém umožní študentom aj výskumníkom presnejšie skúmať aerodynamické vlastnosti rôznych objektov, čo podporí vývoj efektívnych dizajnov v letectve a príbuzných odboroch.

2. Teoretické poznatky o veterných tuneloch a senzorech

Na vytvorenie funkčného systému na meranie vybraných veličín vo veternom tuneli je nevyhnutné dôkladné preskúmanie teoretických poznatkov z oblasti aerodynamiky, senzorových technológií a princípov fungovania veterných tunelov.

2.1. Veterný tunel

Veterný tunel – je špeciálne zariadenie, ktoré slúži na testovanie aerodynamických vlastností objektov. Najčastejšie sa používa na skúmanie aerodynamických vlastností lietadiel ako celku, ale aj

ich konkrétnych častí, v kozmickom priemysle a zároveň aj v automobilovom. Môžu byť skonštruované v reálnej veľkosti pre testovanie predmetov v ich používanom rozmere a zároveň aj v malej mierke, ktorá bude vhodná pre modely.

Hlavné rozdelenie veterných tunelov:

- S otvoreným okruhom (obr.1) – majú otvorené konce na oboch stranách testovacej oblasti a nasávajú vzduch priamo z prostredia, v ktorom sa nachádza tunel. Tunel s otvoreným okruhom má konvergentne divergentný tvar na to aby sa uskutočnila zmena tlaku a rýchlosti prúdenia. (Nagel, 2023)



Obrázok 1 Veterný tunel KLD. Zdroj: Autor

- S uzavretým okruhom – na rozdiel od tunelov s otvoreným okruhom vzduchu používajú uzavretý obvod. Ten istý vzduch je recyklovaný v rámci tunela a prechádza cez testovaciu oblasť. (Nagel, 2023) Rýchlosť vzduchu sa kontroluje zmenou rýchlosti otáčania vrtúľ alebo úpravou uhla nábehu lopatiek. V tuneloch s vysokou rýchlosťou sú v sekciách s nízkou rýchlosťou inštalované vodné chladiace systémy na ochladenie recyklovaného vzduchu. (Lewis, 2018)

Okrem rozdelenia veterných tunelov podľa konštrukcie existuje aj rozdelenie podľa rýchlosti prúdenia v tuneli.

Tradičné veterné tunely sú klasifikované podľa rýchlosti vzduchu prechádzajúceho cez testovaciu sekciu vzhľadom na rýchlosť zvuku (Mach 1). Rozdelené sú do štyroch kategórií (Nagel, 2023):

- podzvukové (Mach <0,8);
- transonické (Mach 0,8 – 1,2);
- nadzvukové (Mach 1,2 – 5,0);
- hypersonické (Mach >5,0).

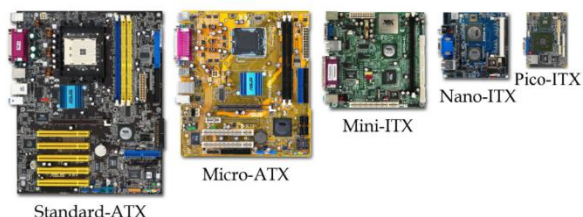
Ďalej sa hovorí iba o veternom tuneli s otvoreným návratom vzduchu a podzvukovými rýchlosťami nakoľko práve taký tunel sa nachádza v laboratóriu Katedry leteckej dopravy a do takého tunelu bol vytvorený systém senzorov.

Aby však mohol takýto veterný tunel slúžiť na meranie a analýzu prúdenia, musí byť vybavený základnými komponentmi – testovacou sekciou s kvalitným prístupom na meranie, systémom na reguláciu prietoku vzduchu, sústavou senzorov, ako aj riadiacou a záznamovou elektronikou. Dôležitou súčasťou je aj vhodný systém spracovania nameraných údajov, ktorý zabezpečuje presnosť a spoľahlivosť výsledkov meraní.

V tejto súvislosti zohráva významnú úlohu mikroprocesorová technika, ktorá umožňuje efektívne riadenie tunela a spracovanie dát. Sa hovorí iba o veternom tuneli s otvoreným návratom vzduchu a podzvukovými rýchlosťami.

2.2. Mikropočítač

Mikropočítač je zariadenie založené na mikroprocesore na jednom čipe. V systéme snímačov, ktorý bol vytvorený mikropočítač slúži ako mozog a riadi celý proces. Mikropočítač používa jeden integrovaný polovodičový čip ako svoju centrálnu procesorovú jednotku (CPU). Obsahujú pamäť vo forme pamäte len na čítanie (ROM) a pamäť s priamym prístupom (RAM), vstupné/výstupné (I/O) porty a zbernicu alebo systém prepojavacích vodičov. Všetko je umiestnené v jednej jednotke, ktorá sa zvyčajne nazýva základná doska (Shea, 2018). Na obrázku 2 sú znázornené príklady mikropočítačov.



Obrázok 2 Príklady mikropočítačov. Zdroj: (Uttam, 2022)

Pri návrhu mechanického prenosného systému merania údajov vo veternom tuneli boli použité mikropočítače od výrobcu Arduino. Produkcia Arduino je známa svojou jednoduchosťou v použití, spoľahlivosťou a dostupnosťou z pohľadu ceny. Konkrétne pri tvorbe systému senzorov bol použitý mikropočítač Arduino NANO. Táto základná doska bola zvolená ohľadom na svoje rozmery a schopnosť splnenia nasledovných úloh:

- spracovanie vstupov – čítanie rôznych druhov vstupov z externých zariadení, ako sú napríklad senzory,

tlačidlá, potenciometre atď. Vstupy môžu byť informácie o teplote, vlhkosti vzduchu, pohybe, tlaku a ďalšie;

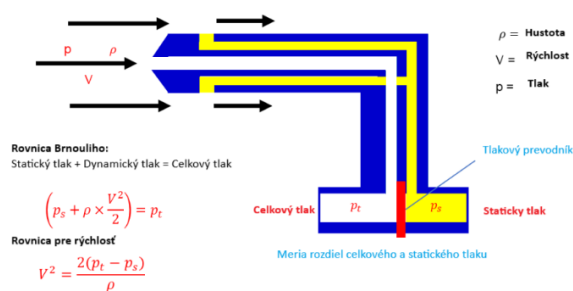
- vykonávanie pokynov – na základe prijatých vstupov vykonanie vopred naprogramovaných postupov;
- generovanie výstupov – po spracovaní vstupov nasleduje ovládanie rôznych výstupných zariadení. Výstupnými zariadeniami môžu byť LED diódy, displeje, motory a iné;
- automatizácia – možnosť vytvárať automatické systémy, ktoré by vykonávali úlohy bez zásahu človeka. Napríklad automatické vynulovanie váh pri zmene testovaného objektu, udržiavanie rovnakej rýchlosti prúdenia vzduchu prostredníctvom otáčok vrtule.

Po zvolení mikropočítača nasledovala časť zvolenia vhodných snímačov.

2.3. Pitot-statická trubica

Vo väčšine prípadov, keď človek hľadá čo je pitot-statická trubica nájde informácie, ktoré povedia, že je to prístroj na meranie rýchlosti lietadla. Správna definícia pitotovej trubice je prístroj, ktorý meria celkový tlak latky ako napríklad je kvapalina alebo plyn. Pitot-statická trubica meria statický a celkový tlak, na základe čoho sa vypočíta dynamický tlak. Na základe týchto veličín prostredníctvom Bernoulliho rovnice sa vypočíta rýchlosť objektu. (Tokyo Aircraft Instrument CO.,LTD. , 2021).

Výpočet dynamického tlaku umožňuje určiť rýchlosť prúdenia vzduchu na základe Bernoulliho rovnice, ako je znázornené na obrázku č. 3. Tento výpočet je kľúčový pri aerodynamických meraniach, pretože rýchlosť prúdenia je jedným zo základných parametrov ovplyvňujúcich aerodynamické sily, ako sú vztlak a odpor.



Obrázok 3 Pitot-statická trubica. Zdroj: (Hall, 2024)

V kontexte experimentov realizovaných vo veternom tuneli však získaná hodnota rýchlosti nepredstavuje rýchlosť pohybu samotného testovaného objektu, keďže ten je fixne umiestnený v testovacej sekcii. Namiesto toho ide o rýchlosť prúdenia vzduchu, ktorý obteká daný objekt.

Pitot-statická trubica sama o sebe neumožňuje priame prepojenie s elektronickým systémom, ako je mikrokontrolér. Preto je potrebné použiť vhodný senzor tlaku, ktorý dokáže tieto hodnoty spracovať a previesť do digitálnej podoby vhodnej na

ďalšie spracovanie. V tomto prípade bol zvolený tlakový senzor MPXV7002DP, ktorý je kompatibilný s vývojovou platformou Arduino. Tento senzor je prepojený s Pitot-statickou trubicou pomocou dvoch flexibilných tlakových hadičiek, pričom jedna slúži na meranie dynamického tlaku a druhá na meranie statického tlaku.

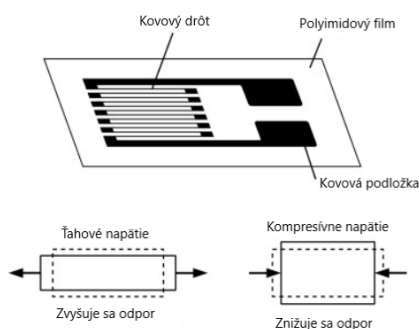
2.4. Senzor hmotnosti

Senzor hmotnosti je typ prevodníka, ktorý mení vstupnú mechanickú silu na inú fyzikálnu veličinu. V našom prípade vstupná mechanická sila je hmotnosť a fyzikálna veličina – elektrický výstupný signál, ktorý sa dá merať a prevádzať. S nárastom sily, ktorá pôsobí na senzor sa elektrický signál úmerne mení. V kombinácii s vhodnou elektronikou, ako je napríklad zosilňovač signálu a mikrokontrolér (napr. Arduino). Tieto je možné dáta spracovať a využiť v rôznych aplikáciách – od meracích systémov až po riadiace algoritmy v automatizovaných zariadeniach. (Futek, 2020)

Hmotnostný senzor funguje na princípe merania mechanickej deformácie pomocou tenzometra. Tenzometer je snímač, ktorého elektrický odpor sa mení v závislosti od mechanickej sily pôsobiacej na jeho povrch. Tento princíp je založený na fyzikálnom jave známeho ako piezorezistivita – teda schopnosť materiálu meniť svoj elektrický odpor pri deformácii. (Futek, 2020)

Pozrieme sa bližšie na štruktúru takého prevodníka (obrázok 4). Zvyčajne je vyrobený z kovového tela (kovový drôt), na ktoré sú pripevnené tenzometre. Kovový drôt je najčastejšie vyrobený z hliníka alebo nehrdzavejúcej ocele. (Futek, 2020) Má dve dôležité vlastnosti:

1. dostatočnú pevnosť, aby odolávalo vysokým zaťaženiám; (Futek, 2020)
2. elasticitu, ktorá mu umožňuje minimálne sa deformovať a vrátiť sa do pôvodného tvaru po odstránení sily. (Futek, 2020)



Obrázok 4 Štruktúra hmotnostného prevodníka. Zdroj: (John X.J. Zhang, 2019)

Keď je aplikovaná sila (napätie alebo kompresia), kovové telo sa mierne deformuje ako pružina. Ak nedôjde k preťaženiu, vráti sa do pôvodného tvaru. Každý taký senzor má svoje obmedzenia maximálnej váhy, kým ju neprekročíme tak nemalo by dôjsť k preťaženiu a poškodeniu prevodníka.

Okrem toho musí byť aj zosilňovač signálu, hlavne z toho dôvodu, že signál poskytovaný tenzometrom nie je dostatočne silný na to aby mikropočítač ho mohol spracovať. Senzor má vysokú presnosť, podľa výrobcu pravdepodobnosť chyby merania je iba $\pm 0,05\%$.

Tento senzor je použitý na meranie vztľaku a odporu, použili sme dva snímače – jeden na meranie vztľaku, ktorý je umiestnený vodorovne a druhý, vertikálny na meranie odporu.

2.5. Senzor teploty a tlaku vzduchu

Posledným dôležitým komponentom pri snímaní a výpočte rýchlosti prúdenia je senzor teploty a tlaku vzduchu.

V kombinácii s Pitot-statickou trubicou tento senzor BMP 180 umožňuje prepočítať tlak na rýchlosť prúdenia vzduchu v dvoch krokoch prostredníctvom základných rovníc:

1. Určenie hustoty vzduchu:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1)$$

kde:

R – plynová konštanta (pre suchý vzduch má hodnotu 287,11, J/kgK);

T – teplota vzduchu (K) ;

p – tlak vzduchu (hPa).

2. Určenie rýchlosti prúdenia:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \quad (2)$$

kde:

p_t – stagnačný tlak (alebo celkový);

p_s – statický tlak;

ρ – hustota vzduchu.

Kombinácia týchto snímačov umiestnených vo veternom tuneli vie zabezpečiť komplexné sledovanie premenných a presné výsledky pri experimentoch smerovaných na zistenie aerodynamických vlastností objektov. Ale pred tým ako systém snímačov bude schopný plniť svoju funkciu je nevyhnutné každý z nich naprogramovať podľa potreby. Na programovanie hardvéru slúži programovací jazyk C/C++.

2.6. Základné znalosti o programovacom jazyku C/C++

Programovacie jazyky C a C++ patria medzi najrozšírenejšie a najplyvnejšie nástroje v histórii softvérového vývoja. Vďaka svojej vysokej efektívitve, rýchlosti a schopnosti nízkoúrovňového programovania sú široko využívané v systémovom programovaní a pri vývoji hardvérov. Práve tieto vlastnosti ich predurčujú na použitie pri práci s produktami spoločnosti Arduino, ktorá predstavuje jednu z najdostupnejších a najpoužívanejších platforiem pre prototypovanie a riadenie elektronických zariadení.

Jazyk C je procedurálne orientovaný, čo znamená, že programová logika je rozdelená do jednotlivých funkcií a riadiacich štruktúr s dôrazom na postupnosť krokov. Naproti tomu C++ rozširuje jazyk C o prvky objektovo orientovaného programovania, čím umožňuje vytváranie zložitejších a modúlnejších softvérových riešení (W3 Schools, 2024). Sú charakteristické vysokou efektivitou a rýchlosťou, schopnosťou systémového programovania (napr. operačné systémy) a sú dostatočne jednoduché na pochopenie.

Arduino IDE využíva syntax týchto jazykov a ponúka užívateľsky prívetivé prostredie s množstvom dostupných knižníc. (Maker.io Staff, 2021). Tie umožňujú jednoduché prepojenie s rôznymi senzormi, aktuátormi či komunikačnými modulmi, čím výrazne urýchľujú vývoj a zvyšujú spoľahlivosť systému.

V rámci vývoja meracieho systému pre veterný tunel boli použité existujúce knižnice, ktoré zabezpečili základné funkcie ako čítanie a spracovanie údajov. Softvér má základnú štruktúru postavenú na funkciách `setup()` (inicializácia) a `loop()` (nepretržité vykonávanie kódu), ktoré sú nevyhnutné pre chod každého Arduino programu (Arduino, 2024).

Existuje veľké množstvo dodatočných podfunkcií, ktoré budú vhodné pre rôzne potreby, ale vždy musia byť použité základné funkcie, bez toho celý systém nebude fungovať.

2.7. Základné znalosti o programovacom jazyku Python

Keď bol celý systém snímačov vytvorený, hardvérová časť bola poskladaná a naprogramovaná, vznikla otázka ako jednoducho a prehľadne sa dostať k výsledkom meraní, uložiť ich a zároveň aj sledovať údaje priamo počas experimentov.

Na vývoj aplikácie schopnej ukladať, spracovávať a zobrazovať výsledky meraní bol použitý aj ďalší programovací jazyk – Python. Ide o jeden z najpopulárnejších programovacích jazykov súčasnosti, ktorý si získal obľubu vďaka svojej jednoduchosti, flexibilitě a rozsiahlej komunite vývojárov. Vďaka týmto vlastnostiam je mimoriadne vhodný pre rýchly vývoj prototypov, automatizáciu, prácu s dátami, vizualizáciu a interakciu so zariadeniami ako sú mikrokontroléry.

Medzi ďalšie dôležité vlastnosti jazyka programovania Python patrí (Diwan, 2022):

1. Podpora rôznych programovacích paradigiem – Python umožňuje procedurálne, funkcionálne aj objektovo orientované programovanie (OOP).
2. Všestranné použitie – možno ho využívať ako skriptovací jazyk na automatizáciu alebo prekladať do bytekódu na tvorbu komplexných aplikácií.
3. Dynamické dátové typy a kontrola typov – dátové typy sa určujú za behu programu, čo prispieva k rýchlemu vývoju.
4. Automatická správa pamäte – jazyk obsahuje vlastný systém na zber nepoužívaných objektov (garbage collection), čím odbremenuje programátora od manuálneho uvoľňovania pamäte.

Hlavné princípy písania kódu v jazyku Python (GeeksForGeeks, 2024):

- Premenné – je to spôsob definície hodnoty, ktorá sa môže následne používať v celom kóde prostredníctvom definovaného symbolu pre túto hodnotu;
- Dátové typy v Pythone (Purple Tutor, 2023) : čísla, reťazce, zoznamy, tuply, none, boolean a slovníky.
- Odsadenie kódu – na rozdiel od C/C++ na označenie blokov kódu namiesto zložených zátvoriek sa používa odsadenie;
- Podmienky a cykly – na rozhodovanie slúžia `if`, `elif`, `else`, na opakovanie úloh – `for`, `while`;
- Funkcie – definované pomocou kľúčového slova `def`;
- Moduly a knižnice.

Tých základných znalostí o Pythone je postačujúce na písanie jednoduchých kódov a postupného rozvoja ich zložitosti a oblasti použitia.

3. Návrh prenosného systému merania vybraných veličín

Po dostačujúcej teoretickej znalosti práce veterného tunelu, snímačov a spôsobov programovania a vývoja softvérov nasleduje časť implementácie týchto znalostí do praktického použitia.

3.1. Systém snímačov

Každý zo senzorov bol postupne mechanicky pripojený k základnej doske a následne naprogramovaný.

Postup tvorenia systému snímačov:

1. Senzor hmotnosti – sám o sebe nepoužiteľný, musel sa navrhnuť taký systém usporiadania senzorov, na ktorý by sa dalo pripojiť modul HX711 a namontovať skúmaný model. Riešenie problému usporiadania senzorov, ktoré by zahŕňalo umiestnenie senzorov a následné umožnenie napájania objektov skúmania na snímače, umiestnenie celého systému do veterného tunelu takým spôsobom aby to neovplyvnilo výsledky merania sa vyriešilo následne (obrázok 5):

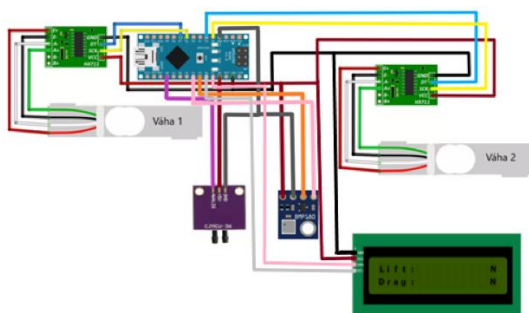


Obrázok 5 Váhy. Zdroj: Autor

Princíp fungovania: model skúmaného objektu je pevne prichytený ku konštrukcii senzorov a následne vystavený riadenému prúdeniu vzduchu vo veternom tuneli. Pôsobením prúdu vzduchu vznikajú aerodynamické sily. Vzlaková sila spôsobuje vertikálny pohyb objektu, čo sa prejavuje ako zmena zdánlivej hmotnosti zachytená horizontálnym senzorom. Po konverzii tejto zmeny pomocou kalibračných koeficientov na silovú veličinu je možné odvodiť hodnotu vzlaku. Odporová sila pôsobí v smere prúdenia a má za následok pozdĺžny posun testovaného objektu smerom k vertikálne orientovanému senzoru. Zaznamenáva tlakovú zmenu, ktorú rovnako možno prepočítať na pôsobiacu silu odporu. Poslednou časťou týkajúcej sa priamo váh je pripojenie dvojriadkovej zobrazovacej LCD jednotky, ktorá slúži iba ako pomôcka na sledovanie ukazovateľov vzlaku a odporu.

2. Pitot-statická trubica a meranie rýchlosti prúdenia - meraní vzlaku a odporu ako základných aerodynamických síl je ďalšou kľúčovou veličinou v rámci experimentov vo veternom tuneli rýchlosť prúdenia vzduchu, ktorá priamo ovplyvňuje veľkosť aerodynamických síl pôsobiach na model. Presné meranie tejto veličiny je nevyhnutné pre spoľahlivú interpretáciu výsledkov a ich porovnateľnosť. Na tento účel bol použitý tlakový senzor MPXV7002DP v kombinácii s pitot-statickou trubicou. Na dosiahnutie vyššej presnosti hodnoty rýchlosti prúdenia vo veternom tuneli je vhodné použitie nie tabuľkovej hodnoty hustoty vzduchu ale vypočítanú hustotu podľa aktuálnej teploty a tlaku vzduchu. Na dosiahnutie tohto cieľu bol použitý senzor BMP180, ktorý vie vykonať meranie tlaku a teploty vzduchu.

Na obrázku 6 je znázornená výsledná schéma zapojenia senzorov do systému.



Obrázok 6 Finálna schéma. Zdroj: Autor

Každý senzor bol postupne naprogramovaný podľa potreby a overený na funkčnosť.

3.2. Aplikácia na ovládanie systému snímačov

Aj keď samotný program Arduino IDE je schopný grafickému a dátovému zobrazovaniu výsledkov pre prijaté riešenie vytvoriť zvlášť softvér, ktorý bude môcť nie len zobrazovať výsledky ale aj ukladať ich. Ukladanie dát je dôležité hlavne pre analýzu, hodnotenie a ďalšiu prácu s nameranými hodnotami. Na

vytvorenie takého softvéru bol použitý program PyCharm a jazyk programovania Python.

Samotný program PyCharm je schopný vykonať požiadané funkcie. Aplikácia je hlavne dôležitá v prípade zmeny zariadenia, prostredníctvom ktorého bude nastavené spojenie s veterným tunelom a snímačmi, nakoľko bude stačiť stiahnuť iba jednu aplikáciu bez komplikovaných krokov.

Výsledkom programovania je počítačová aplikácia na obrázku 7.

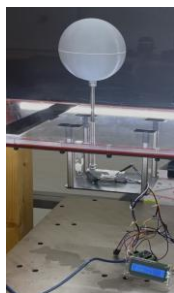


Obrázok 7 Aplikácia

V hornej časti používateľského rozhrania sa nachádzajú polia pre výber portu, na ktorý je pripojený systém senzorov a nastavenie rýchlosti komunikácie. V ďalších poliach sú zobrazené aktuálne namerané hodnoty vzlaku, odporu a rýchlosti prúdenia vzduchu vo veternom tuneli. V dolnej časti obrazovky je zobrazený grafický priebeh týchto hodnôt: zelená krivka predstavuje rýchlosť prúdenia, modrá krivka zobrazuje hodnotu vzlaku a červená krivka reprezentuje odpor. Okrem toho je k dispozícii možnosť nastavenia, ktoré krivky sa majú zobraziť. Tlačidlá „Lift“, „Drag“ a „Velocity“ slúžia na zapínanie a vypínanie zobrazenia príslušných hodnôt v grafe, čo umožňuje používateľovi sledovať a zobrazovať jednotlivé parametre počas merania.

4. Praktická realizácia a overenie funkčnosti systému

Keď je systém a softvér hotový nasleduje etapa testovania senzorov s cieľom overiť ich funkčnosť a presnosť merania. Skúmanie prebiehalo prostredníctvom experimentov vo veternom tuneli, kde sa hodnotila schopnosť systému zaznamenávať a analyzovať aerodynamické parametre rôznych objektov. Dôraz sa kládol na presnosť nameraných údajov, stabilitu meracieho procesu a opakovateľnosť výsledkov, pričom boli získané dáta porovnávané s teoretickými výpočtami a referenčnými modelmi. Na testovanie boli vybrané tri odlišné objekty: kocka, guľa a aerodynamický profil NLF-0416.



Obrázok 8 Systém senzorov a meranie vlastností gule.

Aby bolo možné objektívne vyhodnotiť presnosť senzorov, vykonali sa matematické výpočty aerodynamických charakteristík jednotlivých objektov na základe teoretických rovníc. Výsledky sa následne porovnali s údajmi získanými priamo zo senzorov. Na zabezpečenie presného porovnania boli merania vykonané pri piatich vybraných rýchlostiach prúdenia.

Každé meranie bolo vykonané pri stanovenej rýchlosti prúdenia vzduchu (9,13 m/s, 12,91 m/s, 14,43 m/s, 15,81 m/s a 18,26 m/s) a trvalo 25 sekúnd. V riadiacom kóde pre mikrokontrolér Arduino bolo prednastavené časové oneskorenie 100 ms, čo zodpovedá času 0,1 sekúnd. V dôsledku toho sa počas jednej meracej periódy do výstupného CSV súboru zaznamenalo 250 riadkov údajov obsahujúcich hodnoty vztlačovej a odporovej sily pre danú rýchlosť prúdenia. Neskôr bola z týchto údajov vypočítaná priemerná hodnota vztlaaku a aerodynamického odporu (tabuľka 3), ktorá následne slúžila na ďalšiu analýzu aerodynamických charakteristík objektu.

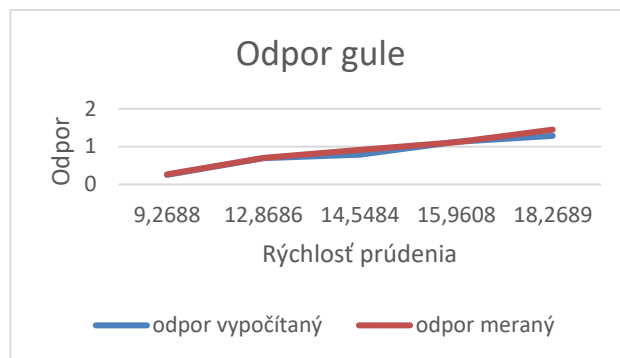
5. Výsledky

Počas vykonania praktickej časti práce bolo vykonané sériu meraní pre rôzne objekty, poddané testovaniu pri rôznych testovacích podmienkach. Nastal čas na vyhodnotenie výsledkov meraní a vypočítaných hodnôt.

5.1. Vyhodnotenie výsledkov pre guľu

Čo sa týka aerodynamického vztlaaku gule, ešte pri teoretickom výpočte bol vykonávaný predpoklad zanedbateľnosti tejto hodnoty berúc do úvahy symetrický geometrický tvar objektu. V konečnom výsledku bol tento predpoklad správny, aj teoretické aj merané hodnoty sa pohybovali medzi hodnotami 0.01–0.06 v závislosti od rýchlosti prúdenia a také malé hodnoty môžu sa vnímať ako zanedbateľné.

Z odporom sa predpokladalo, že ten už bude mať významné hodnoty. Vypočítaný a meraný odpor sa zhoduje. Sú malé odlišnosti, ktoré môžu byť spôsobené vonkajšími podmienkami ako sú aktuálny tlak, teplota a vlhkosť vzduchu, nerovnomernosť prúdenia a drsnosť povrchu samotného objektu. Avšak tie odlišnosti, ktoré vznikli nie sú tak veľké a dá sa povedať, že sú v tolerancii do 10–15%.



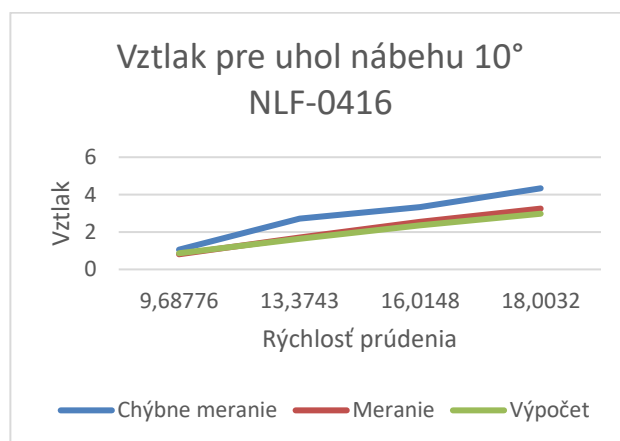
Graf „Odpor gule“ jednoznačne dokazuje, že navrhnutý systém merania aerodynamického odporu poskytuje relevantné a kvalitné dáta, najmä pre objekty s jednoduchým tvarom, ako je guľa

5.2. Vyhodnotenie výsledkov pre profil NLF-0416

Profil NLF-0416 bol podrobený sérii meraní pod vybranými uhlami nábehu a rýchlosťami prúdenia. Bolo zvolených 5 uhlov nábehu (0°, 5°, 10°, 15° a 20°). Pre vyhodnotenie výsledkov meraní boli vybraté najvýznamnejšie hodnoty patriace ku konkrétnym uhlom nábehu.

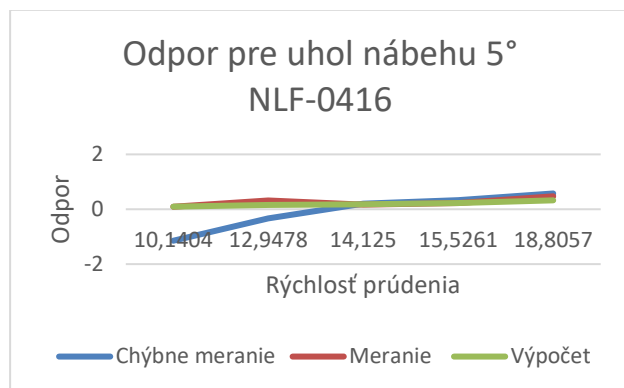
Okrem hlavného merania bolo vykonané aj iné s porušením postupov používania veterného tunelu.

Výsledky ukázali očakávaný nárast vztlaaku so zvyšujúcim sa uhlom nábehu a len minimálne odchýlky (do 10–15 %) medzi meraniami a výpočtami. Pri väčších uhlach (10° a 15°) boli namerané hodnoty mierne vyššie, pravdepodobne v dôsledku lokálnej turbulencie. Porovnanie správnych a chybných meraní pri 10° ukázalo, že nesprávne nastavenie meracích podmienok vedie k výraznému skresleniu výsledkov. Naopak, experimenty za kontrolovaných podmienok preukázali vysokú zhodu s teoretickými modelmi a potvrdili spoľahlivosť meracieho systému aj kvadratickú závislosť vztlaaku od rýchlosti prúdenia.



Odpor profilu NLF-0416 rovnako ako vztlak rastie so zvyšujúcim sa uhlom nábehu, pričom odchýlky medzi meranými a vypočítanými hodnotami neprekračujú 5 %. Pri väčších uhlach sa výsledky odporu zhodovali lepšie. Vyhodnotenie meraní pri uhle 5° ukázalo vplyv experimentálnych chýb – nesprávne merania viedli k nerealistickým záporným hodnotám odporu, zatiaľ čo

správne vykonané merania korešpondovali s teoretickými modelmi.



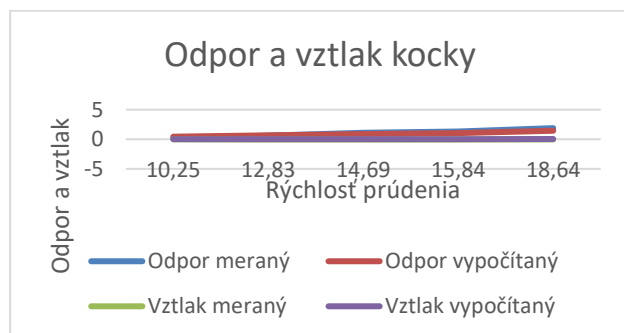
Výsledky potvrdzujú presnosť meracieho systému a spoľahlivosť veterného tunela na experimentálne overenie aerodynamických veličín.

5.3. Vyhodnotenie výsledkov pre kocku

Pre kocku boli merania uskutočnené rovnakým spôsobom ako aj pre predošle objekty a rovnakým spôsobom bolo vypočítané aj teoretické hodnoty.

S kockou sa predpokladala rastúca tendencia odporu, hlavne ohľadom na plochu, ktorá priečila prúdeniu vzduchu a aj na tvar objektu. Pri kocke sú nevýraznejšie odchýlky hodnôt teoretických a meraných, stále sa pohybujú podobne ako pri gule do 15%. Na rozdiel sa od gule vo viacerých prípadoch dosahuje horná hranica tolerancie. Nepresnosti môžu byť spôsobené nie len vyššie opísanými vonkajšími podmienkami ale aj v prvom rade správnosťou umiestnenia kocky v testovacej zóne tunela.

Graf „Odpor kocky“ aj vizuálne znázorňuje, že reálne namerané hodnoty odporu sú častejšie vyššie než teoreticky vypočítané hodnoty (hlavne pri vyšších rýchlostiach prúdenia), čo je v experimentoch bežné v dôsledku zložitosti reálnych podmienok. Dôležité je však, že trend oboch údajových radov je konzistentný.



Situácia so vztlakom je nie menej zaujímavá, nakoľko merané hodnoty sú záporné a vypočítané kladné. Výsledok takéhoto merania je spôsobený tým, že počas montovania kocky na upevňovaciu tyč, závit pokrivil polohu kocky smerom na dol, tým pádom keď vzduch začal prúdiť, namiesto vyvolávania vztlakovej sily začal pritláčať kocku nadol. Rovnako ako pri profiloch so záporným uhlom nábehu. V oboch prípadoch veľkosť

hodnoty vztaku je tak malá, že sa pohybuje okolo hodnoty 0, čo je vidieť aj na grafe.

Prípád s kockou preukázal dôležitosť správneho umiestnenia objektu v tuneli podľa postupov a to, ako umiestnenie môže ovplyvniť finálny výsledok.

6. Metodika a metódy skúmania

V teoretickej fáze boli zozbierané poznatky z oblasti aerodynamiky, senzoriky a meracích systémov. Informácie z odbornej literatúry boli analyzované, porovnávané a využité ako základ pre návrh praktickej časti práce.

Praktická realizácia prebiehala v niekoľkých krokoch. Najprv boli zostavené mechanické a elektronické časti systému, pričom dôraz sa kládol na spoľahlivé spojenia medzi senzormi a mikropočítačom. Následne sa pristúpilo k programovaniu snímačov v prostredí Arduino, pričom každý senzor bol individuálne nastavený a otestovaný.

Ďalšou fázou bol vývoj softvéru v jazyku Python na vizualizáciu a ukladanie dát z meraní. Po dokončení a otestovaní jednotlivých funkcií bol systém inštalovaný do veterného tunela a vykonané experimentálne merania na modeli profilu NLF 0416, kocke a gule.

Výstupy z meraní boli spracované do grafickej a analytickej podoby a porovnané s teoretickými očakávaniami.

7. Záver

Hlavným cieľom bol návrh, zostrojenie a experimentálne overenie systému senzorov vo veternom tuneli, vrátane vývoja softvérového rozhrania na zber, vizualizáciu a spracovanie údajov v reálnom čase. V rámci riešenia boli úspešne implementované metódy dátovej analýzy a syntézy, kombinujúce mechanickú montáž, programovanie a softvérový vývoj. Dôsledná teoretická príprava výrazne prispela k plynulej realizácii praktickej časti.

Porovnanie teoretických výpočtov so získanými experimentálnymi údajmi preukázalo vysokú mieru zhody, pričom odchýlky vztaku a odporu sa vo všetkých prípadoch pohybovali v rámci tolerancie do 15%. Identifikované rozdiely možno pripísať presnosti senzorov, lokálnym turbulenciám a drobným experimentálnym chybám. Významným faktorom presnosti meraní bolo presné dodržiavanie metodiky, najmä stabilizácia prúdenia a správna fixácia objektu. Nesprávne experimentálne postupy v úvodných meraniach viedli k nerealistickým hodnotám, čo zdôraznilo citlivosť systému na podmienky merania.

Navrhnutý systém preukázal vysokú funkčnosť, presnosť a nákladovú efektívnosť. Použité komponenty poskytujú dostatočnú stabilitu pre výučbové a výskumné účely, pričom softvérové rozhranie bolo navrhnuté pre prehľadné a efektívne spracovanie údajov. Celkovo práca úspešne naplnila stanovené ciele, významne prispela k rozšíreniu možností využitia veterného tunela a pripravila základy pre budúce experimentálne a výskumné projekty.

Pod'akovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

Arduino. 2024. docs.arduino.cc. *setup() and loop()*. [Online] 16. 05 2024. [Dátum: 04. 12 2024.] <https://docs.arduino.cc/language-reference/en/structure/sketch/loop/>.

Diwan, Amit. 2022. What are the basic concepts of Python? *tutorialspoint*. [Online] 15. 9 2022. [Dátum: 27. 1 2025.] <https://www.tutorialspoint.com/what-are-the-basic-concepts-of-python>.

Futek. 2020. Futek. *Weight Sensor*. [Online] Futek, 2020. [Dátum: 16. 09 2024.] <https://www.futek.com/weight-sensor>.

GeeksForGeeks. 2024. Learn Python Basics. *geeksforgeeks*. [Online] 20. 11 2024. [Dátum: 27. 1 2025.] <https://www.geeksforgeeks.org/python-basics/>.

Hall, Nancy. 2024. Glenn Research Center. *Pitot-Static Tube-Speedometer*. [Online] 8. Júl 2024. [Dátum: 8. September 2024.] <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/pitot-static-tube-speedometer/#>.

John X.J. Zhang, Kazunori Hoshino. 2019. Science Direct. *Metal Strain Gauge*. [Online] 2019. [Dátum: 16. September 2024.] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/metal-strain-gauge>.

Lewis, Robert. 2018. Wind tunnel. *Encyclopaedia Britannica*. [Online] 07. Jún 2018. [Dátum: 29. Júl 2024.] <https://www.britannica.comhttps://www.britannica.com/technology/wind-tunnel>.

Maker.io Staff. 2021. Maker.io. *An Introduction to Arduino Libraries*. [Online] 21. 04 2021. [Dátum: 04. 12 2024.] <https://www.digikey.sk/en/maker/tutorials/2021/an-introduction-to-arduino-libraries>.

Nagel, Lauren. 2023. Types of Wind Tunnels and How They Work 2024. *TYTO ROBOTICS*. [Online] 15. August 2023. [Dátum: 5. August 2024.] <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/types-of-wind-tunnels>.

Purple Tutor . 2023. Basic Concepts od Python Programming. *Purpletutor*. [Online] 1. 2 2023. [Dátum: 27. 1 2025.] <https://purpletutor.com/coding/basic-concepts-python/>.

Shea, Sharon. 2018. TechTarget. *techtarget.com*. [Online] December 2018. [Dátum: 3. September 2024.] <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/microcomputer>.

Tokyo Aircraft Instrument CO.,LTD. . 2021. Tokyo Aircraft Instrument CO.,LTD. . *What Is a Pitot Tube*. [Online] 2021. [Dátum: 09. 09 2024.] <https://www.tkk-air.co.jp/english/aerospace/air-data/pitot-tubes.html>.

Uttam, Raj Kumar. 2022. Types of Motherboards. *Geeks for geeks*. [Online] 24. Marec 2022. [Dátum: 3. September 2024.] <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-motherboards/>.

W3 Schools. 2024. w3schools. *C++ Introduction*. [Online] W3 Schools, 2024. [Dátum: 4. 12 2024.] https://www.w3schools.com/cpp/cpp_intro.asp.



KONŠTRUKCIA BEZPILOTNÉHO LETÚNA S MOŽNOSŤOU VTOL

Július Berki

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Filip Škultéty

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Article focuses on the design, construction, and testing of an unmanned aerial vehicle (UAV) with vertical take-off and landing (VTOL) capabilities that does not require thrust vectoring mechanisms. The goal of the work was to create a simpler and more reliable prototype compared to most UAV convertiplanes, which use mechanisms for thrust vectoring, while being built from cost-effective materials. This UAV may be intended for the public as a DIY project. The article providing a design of the aircraft, including aerodynamic parameters, material selection, and electronic components. Airflow simulations using specialized software tools for aerodynamic analysis were applied during the development process. Experimental testing of the prototype was conducted in real-world conditions, including vertical take-offs and landings on a specially designed test polygon, where stability and hovering flight characteristics were monitored. Based on the results from the experimental tests, the success of the design was evaluated by the critical approach, which then led to the formulation of recommendations for improving the aircraft's design. The article also offers a guide to building DIY UAVs and provides a basis for further research in this area.

Keywords

VTOL UAV, 3D printed aeroplane, RC model

1. Úvod

Práca sa zameriava na konštrukciu bezpilotného letúna s vertikálnym vzletom a pristátím (VTOL). Ambíciou tejto práce je navrhnuť, skonštruovať a otestovať bezpilotný letún s možnosťou vertikálneho vzletu a pristátia so systémom zmeny režimu letu, ktorý nevyžaduje zmenu vektora ťahu. Vďaka absencii mechanizmu, ktorý by pohyboval motormi na zmenu vektora ťahu, má byť letún jednoduchší, ľahší a spoľahlivejší. Letún má byť postavený z cenovo dostupných materiálov a má využívať 3D tlač, čo umožní jeho rýchlu montáž. Tento prístup zabezpečí, že bude dostupný na internete ako tzv. Do It Yourself (DIY) projekt, pričom aj časť práce môže poskytnúť návod na jeho zostavenie pre široké spektrum používateľov.

2. Metodika a metódy skúmania

Cieľom tejto práce je navrhnuť, skonštruovať a experimentálne overiť bezpilotný lietajúci prostriedok s možnosťou vertikálneho vzletu a pristátia. Zvolený cieľ zahŕňa všetky fázy vývoja, počnúc analýzou a návrhom, cez CFD simulácie, až po praktickú realizáciu a overenie funkčnosti prototypu v reálnych podmienkach. V úvodnej etape vývoja bola vykonaná rozsiahla rešerš technickej literatúry a dostupných odborných zdrojov, vrátane vedeckých štúdií, článkov a technických dokumentácií UAV systémov. Dôraz bol kladený aj na analýzu výhod a nevýhod jednotlivých konštrukčných prístupov a na možnosti ich aplikácie v rámci nášho návrhu.

Na základe syntézy získaných poznatkov bol vytvorený koncepčný návrh UAV. V experimentálnej časti vývoja bol zostrojený funkčný prototyp, ktorý prešiel sériou testov. V pokročilej fáze projektu boli realizované letové skúšky v reálnych podmienkach. Ich cieľom bolo otestovať stabilitu, ovládateľnosť a schopnosť autonómneho vzletu a pristátia. Výsledky týchto testov poskytli praktické údaje o správaní systému v teréne a

odhalili kľúčové aspekty potrebné pre ďalšie zlepšovanie návrhu.

V rámci vývoja bol tiež navrhnutý a zostavený testovací polygón, ktorý umožňuje kontrolované testovanie vzletu a pristátia UAV. Výsledky všetkých testov boli vyhodnotené induktívnou metódou s cieľom získať závery o funkčnosti a spoľahlivosti systému. Na základe získaných poznatkov boli sformulované konkrétne odporúčania pre budúci vývoj UAV platformy s VTOL schopnosťou.

3. Návrh letúna

V rámci navrhovania UAV sme využívali softvér Autodesk Fusion 360 a XFLR5, pričom na simulácie sme použili Ansys Discovery. XFLR5 nám pomáhal pri prvotnom návrhu lietadla a plánovaní umiestnenia elektroniky tak, aby bolo možné dodržať správnu polohu ťažiska, čo je pri tomto type UAV náročnejšie ako pri konvenčných letúnoch s konvenčným vzletom a pristátím (CTOL). Dôvodom je, že ťažisko musí byť správne vyvážené nielen v horizontálnom lete, ale aj pri vertikálnom vzlete a pristátí. Návrh ťažiska pre vertikálny vzlet sme určovali jednoduchou geometrickou metódou. Pomocou dvoch úsečiek, ktoré diagonálne spájajú elektromotory. Ich priesečník predstavuje približnú polohu ťažiska UAV v režime vertikálneho vzletu. Pri prechode do horizontálneho letu je však potrebné, aby sa toto ťažisko nachádzalo pred neutrálnym bodom letúna. XFLR5 nám umožňoval presne umiestňovať jednotlivé elektrosúčiastky a ďalšie komponenty UAV na základe súradníc. Mohli sme zadávať hmotnosti rôznych častí, ako sú krídla, trup a ostatné prvky draku. Po výrobe jednotlivých dielov sme ich postupne odvážili a získané údaje zadávali do XFLR5, čím sme postupne spresňovali výpočty. Postupne sme nahrádzali predpokladané hodnoty už zmeranými hmotnosťami a rozmermi jednotlivých komponentov, čo nám umožnilo ešte presnejšie optimalizovať celkovú rovnováhu lietadla. Vzhľadom

na získané údaje z XFLR5 sme upravovali celkový návrh UAV v programe Fusion360 a aktualizovali hodnoty naspäť v XFLR5. Pričom sme priebežne menili tvar a rozloženie hmotnosti tak, aby boli splnené požiadavky na stabilitu a ovládateľnosť v oboch letových režimoch. Plošné zaťaženie krídla sme získaním meraním hmotnosti hotového letúna a následnom výpočte plochy pomocou Xflr5. Plošné zaťaženie je $4,95 \text{ kg/m}^2$. Pri hmotnosti letúna $1,50 \text{ kg}$ a ploche krídla $0,306 \text{ m}^2$.

Vztlak, ktorý vyvinie letún už pri 0° napomáha nosným rotorom o 1376 g . Odpor letúna pri tomto režime je $2,17 \text{ N}$. Tieto hodnoty boli získané softvérom Ansys Discovery pri rýchlosti 15 m/s . Výsledky simulácií ukázali, že neutrálny bod sa nachádza vo vzdialenosti 2 cm od zadného konca trupu.

4. Analýza materiálov pre 3D tlačené diely

Medzi základné typy materiálov používaných pri 3D tlači pre rôzne aplikácie UAV patria ABS (akrylonitrilbutadiénstyren), PETG (glykol-modifikovaný polyester), PLA (polylaktid), ASA (akrylonitril-styren-akrylát) a nylon. Tieto materiály sa vyznačujú rôznymi pevnostnými vlastnosťami, rôznymi cenami a rôznou chemickou odolnosťou. Pri výrobe testovacích dielov, ktoré slúžili na overenie presnosti rozmerov, sme zvolili filament typu PLA. Tento materiál bol vybraný vzhľadom na jeho nízku cenu, relatívne jednoduché tlačenie a stabilitu pri 3D tlači. PLA je tiež známa ako kyselina polymliečna. Tento filament je vyrobený z obnoviteľných materiálov, ako sú cukrová trstina alebo kukuričný škrob, na rozdiel od iných polymérov, ktoré sú väčšinou vyrobené z ropy. Vzhľadom na svoje ekologické pôvody je tento polymér veľmi populárny v sektore 3D technológie. Tlačí pri pomerne nízkych teplotách na rozdiel od ostatných spomínaných materiálov teplotách od 190°C do 230°C [1]. Dôvodom použitia filamentu PLA len na testovacie účely sú jeho nevýhody. Najväčším problémom je nízka teplota topenia, čo znamená, že výtlačky vyrobené z tohto materiálu sú náchylné na deformácie pri vyšších teplotách. Teplota topenia je výrobcami často deklarovaná na približne 180°C . Z praxe však vieme, že RC letúny vyrobené z PLA sa môžu deformovať aj v sklenených kufrách áut na priamom slnku. Vysoké teploty dosahované v uzavretých automobiloch počas letných mesiacov môžu spôsobovať, že výrobky začnú mäknúť, deformovať pričom sa prakticky stávajú znehodnotenými. Dôvodom je aj slabá odolnosť pred UV žiarením. Ďalšou nevýhodou PLA je jeho krehkosť a slabá elasticita. Tento materiál je náchylný na prasknutie alebo zlomenie pri nárazoch.

PETG je termoplastický materiál bežne používaný v sektore 3D tlače. Je to plne recyklovateľný materiál. Má podobnú chemickú štruktúru ako polyetyléntereftalát, známy pod skratkou PET [2]. Oproti PLA vyniká tvárnosťou, odolnosťou voči nárazom a chemikáliám. Okrem toho má dobrú tepelnú stabilitu a odolnosť voči UV žiareniu. Tlač je o niečo zložitejšia, a to kvôli vyšším teplotám tlače materiálu, ktoré sa pohybujú medzi 220°C a 260°C a teplote podložky okolo 80°C . Táto vlastnosť zvyšuje rozdiel medzi teplotou v priestore tlače a okolitou atmosférou, čo môže viesť k deformáciám a dvíhaniu a odlepovaniu rohov výtlačku od podložky. V tomto prípade je kryt výhodou, ale nie je podmienkou. Cena PETG je pomerne nízka, ale existuje modifikácia ešte nižšou cenou a podobnými vlastnosťami, ktorou je rPETG. Tento filament sa odlišuje hlavne procesom výroby, vyrába opätovným spracovaním recyklovaného odpadu. Surovina je najprv rozdrvená, následne znovu zmiešaná a

homogenizovaná, čím vzniká recyklovaný PETG filament, ktorý má výrazne nižší dopad na životné prostredie. Pre väčšinu dielov sme vybrali práve materiál typu rPETG. Nevýhodou PETG a rPETG je, že pri tenkých stenách môže mať tendenciu sa ohýbať. Je dôležité to brať do úvahy a pri modelovaní sa vyhnúť tenkým, úzkym a vysokým stenám bez podpôr. Ďalšou nevýhodou PETG a rPETG, ale len v porovnaní s LW-PLA je ich vyššia hustota, čo vedie k zvýšenej hmotnosti vytlačených objektov.

ASA, ktorý je v podstate vylepšeným nástupcom ABS, má veľmi podobné výhody, ale zároveň eliminuje mnohé nevýhody ABS. ASA má lepšiu UV stabilitu a je menej náchylný na deformácie. Vyznačuje sa aj vyššou pevnosťou a menšou krehkosťou pri nižších teplotách. Pri tvorbe tejto práce sme s ASA experimentovali a zistili sme, že potrebuje podobné nastavenia ako PETG. Je jednoduchší na tlač oproti ABS. Okrem toho, ASA má nižšiu hustotu, čím sa približuje k materiálom ako LW-PLA (ľahké PLA). Vďaka tejto vlastnosti, môžeme ušetriť do 20% hmotnosti na draku UAV [3]. Celkovo je ASA v mnohých ohľadoch lepšou voľbou, ako rPETG. Dôvodom uprednostnenia rPETG pred ASA je predovšetkým cena. Po analýze trhu s filamentmi sme zistili, že cena ASA je približne trikrát vyššia ako cena rPETG.

Ďalšou špeciálnou kategóriou sú flexibilné materiály, konkrétne TPU (termoplastický polyuretán). Tento materiál kombinuje vlastnosti gumy a plastu, čo mu umožňuje byť veľmi flexibilným, pružným a extrémne odolným na ťah. Jeho mechanické vlastnosti sa menia v závislosti od geometrie vytlačeného objektu. Pri tenších dieloch je TPU pružnejší, zatiaľ čo pri hrubších dieloch dochádza k zníženiu pružnosti. Uvedené vlastnosti je možné dobre regulovať aj pomocou nastavenia výplne – nemusí byť potrebné vytvárať tenké steny, namiesto toho môžeme upraviť percento vyplnenia alebo tvar pôdorysu vyplnenia objektu (napr. obdĺžnikové, včelí plást, trojuholníkové). TPU je vhodné na výrobu dielov, ako sú tesnenia, ochranné kryty. Pri 3D tlači je však nevyhnutné použiť tlačiareň vybavenú direct extruderom, keďže TPU nie je kompatibilné s tlačiarňami vybavenými bowdenovým podávačom filamentu. Tento materiál sme využili pri tvorbe zavesenia kormidiel a stabilizátorov. Taktiež na krytky pristávacieho zariadenia.

Na základe analýzy a experimentov pri tlači jednotlivých materiálov sme vybrali nasledovné materiály pre tvorbu prototypov častí letúna. Na vytváranie predbežných prototypov, najmä na testovanie zapadania dielov a overenie správnosti rozmerov, sme použili PLA. Ako hlavný materiál pre výrobu trupu, chvostových plôch a kormidiel sme zvolili rPETG, ktorý poskytuje vyváženosť medzi pevnosťou a cenou. Na výrobu závesov kormidiel sme sa rozhodli pre flexibilný materiál TPU, ktorý umožňuje pohyb. Na konce krídiel sme použili materiál ASA, ktorý je ľahký a odolný voči nárazom.

5. Stavba letúna

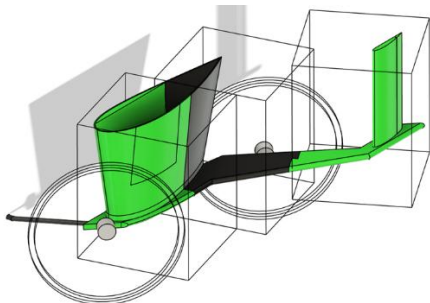
Trup a chvostové plochy lietadla boli vyrobené pomocou 3D tlače, zatiaľ čo krídla boli zhotovené ručne rezaním polystyrénu a následným potiahnutím balzou. Pri navrhovaní 3D tlačeného lietadla je dôležité zohľadniť orientáciu vrstiev, keďže táto vlastnosť výrazne ovplyvňuje pevnosť, pružnosť a odolnosť častí. Vzhľadom na to, že väčšina 3D tlačiarň sú často konštruované s najväčším priestorom na tlač vo vertikálnej rovine, nie vždy je

možné optimálne nastaviť orientáciu vrstiev podľa požiadaviek dizajnu. Orientácia vrstiev 3D tlačeneho trupu a krídiel lietadla má významný vplyv na ich pevnosť, pričom aj nepatrne ovplyvňuje aerodynamiku. Ak sú vrstvy usporiadané priečne na pozdĺžnu os, pri tvrdom pristáti môže dôjsť k ich ľahšiemu oddeleniu, pričom praskliny sa často šíria pozdĺž jednotlivých vrstiev. Tento efekt je výraznejší pri nekvalitne vytlačených povrchoch, tlačenej pri nízkych teplotách. Naopak, ak sú vrstvy orientované pozdĺž smeru letu, ich odolnosť voči silám pri pristávaní je vyššia, pričom sú pružnejšie a namiesto praskania sa ohnú, čo zvyšuje ich schopnosť absorbovať nárazy.

Aby sa trup UAV zместil do tlačovej plochy, bolo nevyhnutné rozdeliť ho na viacero častí. Tento krok je nevyhnutný v prípade 3D tlače, kde veľkosť tlačového priestoru predstavuje jeden z najväčších obmedzujúcich faktorov. Okrem toho, jedným z hlavných problémov pri tlači komplexných modelov je potreba podpôr, ktoré sa používajú na stabilizáciu a podporu previsov. Naším cieľom bolo minimalizovať potrebu podpôr, keďže ich použitie môže výrazne ovplyvniť čas tlače, spotrebu materiálu a následné úpravy modelu po vytlačení, ako aj kvalitu povrchu. V prípade trupu nášho letúna sme pristúpili k návrhu tak, aby sme eliminovali potrebu podporných štruktúr úplne. Tento cieľ sme dosiahli orientáciou dielov na tlačovej ploche a ich rozdelením tak, aby sa dali tlačiť postupne od krajov ku stredu. Tento prístup umožňuje, aby sa jednotlivé diely tlačili stabilne, bez potreby dodatočných podpôr. Okrem toho, týmto spôsobom sme znížili riziko deformácie alebo posunutia dielov počas tlače.

Pri vytváraní modelu sme použili softvér Autodesk Fusion 360, ktorý nám umožnil presne definovať a optimalizovať tlačové priestory pre jednotlivé diely. V rámci návrhu sme v softvéri vytvorili tri priehľadné kvádre, ktoré predstavujú maximálne možné rozmery tlačového priestoru. Tieto kvádre sme použili na rozdelenie trupu na čo najmenší počet dielov. Na najlepšie využitie priestoru sme časti trupu orientovali diagonálne na tlačovú plochu.

V rámci prípravy modelu na tlač sme zároveň pripravili aj spoje medzi jednotlivými dielmi. Na dosiahnutie čo najvyššej pevnosti sme využili spoje v tvare písmena Z. Tento tvar zabezpečuje maximálnu plochu na naniesenie lepidla, a tým pádom aj vyššiu odolnosť spoja proti mechanickým silám. Okrem toho tieto spoje zvyšujú presnosť a uľahčujú montáž pri lepení jednotlivých dielov. Kvádre aj Z-spoje vidíme na obr. č. 1.



Obrázok 1 Dimenzovanie 3D tlačenej časti na tlačovú plochu tlačiarne
[Zdroj: autor]

Krídlo je navrhnuté ako plnostenné so sendvičovým potahom a vystužené jedným nosníkom, ktorý prenáša hlavné zaťaženie a zabezpečuje mechanickú odolnosť konštrukcie. Potah pozostáva

z balzového dreva, ktoré poskytuje potrebnú tuhosť pri zachovaní nízkej hmotnosti, lepidla a nažehľovacej fólie, ktorá vytvára hladký povrch, minimalizuje odpor vzduchu a zároveň prispieva k celkovej pevnosti krídla tým, že ho spevňuje a spája dokopy pomocou zmrštenia po aplikácii tepla.

Vnútrotný priestor je vyplnený polystyrénom, ktorý slúži ako ľahké jadro, zabezpečujúce rozloženie zaťaženia pri zachovaní minimálnej hmotnosti. Takáto konštrukcia zlepšuje torznú tuhosť a odolnosť voči deformáciám pri dynamickom namáhaní počas letu. Zároveň bude vytvárať priestor pre servomotory a káble.

Koncové časti krídla, vyrobené technológiou 3D tlače, plnia funkciu uzatvorenia konštrukcie a zvyšujú aerodynamickú efektivitu. Majú fungovať ako násady, do ktorých sa krídla zasunú a chránia konce krídiel pred odlepovaním fólie a proti natrhnutiu a šírením trhlín.

6. Elektronika

Pre ovládanie modelu sme zvolili prijímač FrSky X8R v kombinácii s diaľkovým ovládačom a vysielacím modulom FrSky Taranis X9E. Pre naše UAV sme sa rozhodli použiť riadiacu jednotku KK 2.1.5, ktorá predstavuje cenovo efektívnu alternatívu k drahším a technologicky pokročilejším systémom. KK 2.1.5 ponúka výborný pomer ceny. Tento systém je vybavený integrovaným LCD displejom, čo umožňuje priamu interakciu s riadiacou jednotkou priamo v teréne. Užívatelia môžu upravovať letové režimy a parametre v reálnom čase bez potreby pripojenia k počítaču alebo použitia externej programovacej karty.

Ako servomotor sme zvolili analógový 180° mikro servomotor s krútiacim momentom 1,2 kg/cm, konkrétne typ AS55 Analog Micro od spoločnosti Dualsky. Napájanie zabezpečuje štvorčlánkový LiPo akumulátor s kapacitou 1300 mAh a napätím 14,8 V. Pri tomto type akumulátora je teoretický maximálny čas letu, pri maximálnom odbere elektrického prúdu, približne 1,23 minúty. Použili sme PDB (Power Distribution Board) od spoločnosti Matek Systems, konkrétne verziu Matek 3A. Táto distribučná doska je vybavená dvoma BEC (Battery Elimination Circuit) modulmi – jedným s napätím 5 V a maximálnym prúdom 2 A pre servomotory a druhým s napätím 12 V a prúdom 0,5 A pre možnosť pripojenia kamery. Dosku sme doplnili XT60 konektorom, ktorý patrí medzi najčastejšie používané konektory v modelárstve. Naša PDB doska umožňuje zapojenie až šiestich regulátorov otáčok s elektromotormi.

7. Polygón na test VTOL režimu

Okrem stavbou UAV sme sa zaoberali aj návrhom a realizáciou testovacieho polygónu, ktorý slúži na testovanie letových vlastností a stability VTOL bezpilotných lietadiel. Cieľom tohto testovacieho prostredia je poskytnúť bezpečné a efektívne prostredie na overenie vznášania sa, vzletov a pristátí. Tento polygón bol navrhnutý tak, aby bol využiteľný nielen v rámci tejto práce, ale aj pre budúce projekty študentov Katedry leteckej dopravy. Polygón sa skladá z niekoľkých komponentov. Základnou časťou systému je ochranná sieť, ktorá pôvodne slúžila ako bezpečnostný prvok pri atletických disciplínach. Sieť zabezpečuje ochranu pred nárazmi testovaného VTOL lietadla do zeme, čím minimalizuje riziko poškodenia lietadla pri

neúspešných štartoch alebo pristátiach. Sieť rovnako má aj chrániť elektromotory a vrtule pomocou zamotania sa do siete a tým zastavenia sa motorov.



Obrázok 2 Pohľad na zostavený polygón [Zdroj: autor]

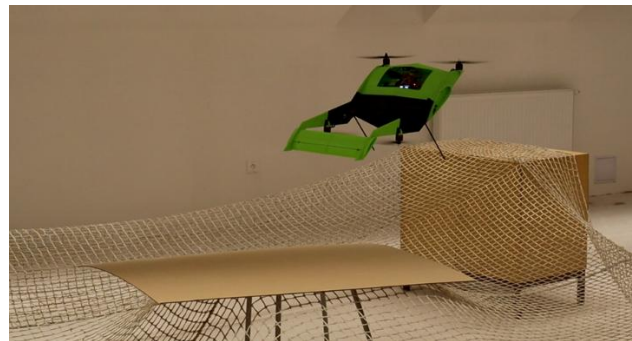
Na spomalenie pádu lietadla a zníženie nárazovej sily pri kontakte so zemou sú použité oceľové ťažné pružiny, na ktorých je upevnená sieť. Pružiny sú umiestnené na oceľových roxoroch. Do zostavy patrí desať týchto oceľových tyčí, ktoré sú farebne kontrastné biele a červené. Toto umožňuje pilotovi RC lietadla ľahko rozpoznať rozmery polygónu a udržať bezpilotné lietadlo v bezpečnom dosahu siete počas testov. Polygón je zároveň navrhnutý tak, aby bol jednoducho prenosný a rýchlo zostaviteľný. Celkový čas na zostavenie testovacieho polygónu nepresahuje pár minút, čo zaisťuje vysokú flexibilitu pri jeho použití v rôznych miestach.

8. Testovacie lety

Prvý prototyp letúna V1, ktorý bol zostrojený bez krídel a bol určený výhradne na vertikálny režim letu VTOL. Testovanie prebiehalo na novo zostavenom skúšobnom polygóne. Polygón sa rozložil v interiéri kvôli silnému vetru a kvôli zminimalizovaniu vonkajších vplyvov. Úvodné testovanie bolo v upútanom režime, pri ktorom sa testovala správna rotácia vrtúl a reakcie riadiacich príkazov na informácie od gyroskopov. Cieľom tohto testu bolo overiť, či letový riadiaci systém správne interpretuje údaje zo senzorov a vykonáva zodpovedajúce korekcie pri náklonoch lietadla. Po niekoľkých neúspešných pokusoch, ktoré zahŕňali aj niekoľko opravných programovaní, lietadlo správne reagovalo na náklony a začalo sa vyrovnávať späť do svojej rovnovážnej polohy.

Po úspešnom overení správnej reakcie gyroskopov a rotácie vrtúl sme pristúpili k ďalšiemu testu, ktorý zahŕňal prvý krátky kontrolovaný vzlet. Bol to malý skok a následné pristátie do bezpečnostnej siete. Tento test bol zameraný na overenie schopnosti lietadla vykonať vertikálny let s kontrolovaným vzletom a pristátím, pričom sa testovala stabilita a reakcie na zmenu výšky. Lietadlo pri tomto teste vykázalo stabilné reakcie a dokázalo sa úspešne vrátiť do požadovanej polohy. Počas druhého letu bol predĺžený letový čas na účely testu manévrovateľnosť, vrátane cúvania a pohybov do strán. Všetky príkazy od ovládača uskutočnil správne. Zistilo sa, že nie je aktivovaná plná stabilizácia ale len čiastočný režim. Táto chyba nedovoľovala lietadlo udržať na jednom mieste. Vzhľadom na

obmedzený priestor prototyp okamžite narazil a následne bol zničený. Stiesnené priestory nedovoľovali dostatočný čas na reakciu a záchranu lietadla. Táto havária však poskytla cenné informácie o tom, ako je potrebné upraviť verziu číslo dva. Poškodenie sa týkalo iba tlačeneho trupu, ktorý bol úplne zničený.



Obrázok 3 Prvý vzlet prototypu [Zdroj: autor]

Druhý test nášho letúna bol zameraný na overenie prechodu do režimu horizontálneho letu a následný návrat do vertikálneho pristátia. Po opätovnej kalibrácii riadiacej jednotky sme vykonali let už bez použitia testovacieho polygónu. Tentoraz sme vzlietli do vyššej výšky.

Hlavným rozdielom oproti predchádzajúcim testom bol fakt, že tento letový test UAV sa uskutočnil v reálnych vonkajších podmienkach v exteriéri. Dôvodom bolo, že vertikálny štart už bol úspešne otestovaný, overený a pre testovanie prechodu do horizontálneho letu už nebol testovací polygón potrebný. Test sa uskutočnil na letisku Janíkovce v Nitre, pričom jeho realizácia bola niekoľko týždňov odkladaná z dôvodu nepriaznivého počasia. Na realizáciu testu bolo žiadúce stabilné počasie a bezvetrie, aby sa minimalizovalo riziko vplyvu vetra na správanie sa UAV, a to najmä počas visenia.

Letún bol v tejto fáze už vybavený krídlami a doplnený o dodatočný AUX kanál, ktorý bol ovládaný dvojpolohovým prepínačom na vysielacom. Tento kanál slúžil na prepínanie medzi letovými režimami.

Počas testu bol vykonaný len jeden let, ďalšie pokusy boli prerušené z dôvodu opätovného zhoršenia počasia. Test spočíval v štarte do väčšej výšky, po ktorom bolo UAV naklonené smerom na hlavu. Podobne ako pri multikoptérach. Následne bola deaktivovaná pokročilá stabilizácia, vďaka čomu sa UAV dostalo do režimu dopredného letu. Po krátkom úseku letu bolo UAV opäť naklonené do pôvodnej vertikálnej polohy a stabilizácia bola znovu aktivovaná. Pri pokuse o pristátie sa prejavili limity riadiacej jednotky, ktorá spôsobovala nežiadané naklápanie UAV smerom dozadu. Tento sklon bol počas pristávacieho manévru manuálne kompenzovaný, až do minimálnej výšky z ktorej bolo možné bezpečne pristáť. V kritickom momente bola plynová páka stiahnutá na minimum, aby sa predišlo poškodeniu druhého prototypu. Zničenie prvého prototypu spôsobilo značné zdržanie v testovacej fáze. Z dôvodu možného rizika poškodenia druhého prototypu pred jeho vlastnou prezentáciou na obhajobe práce sme sa rozhodli naplánovať ďalšie testovacie lety koncom mesiaca máj 2025.

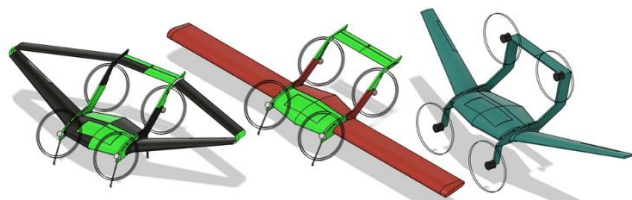


Obrázok 4 UAS V2 pri testovaní [zdroj: autor]

9. ĎALŠIE POKRÁČOVANIE VÝVOJA

Letún by sa mohol ďalej vyvíjať aj inými spôsobmi. Navrhujeme ďalšie dva možné varianty. Prvý variant by sa zamerával na zjednodušenie stavby, druhý variant by bol orientovaný na zvýšenie rýchlosti letu.

V prvom variante potenciálneho UAV sa uvažuje o návrhu s cieľom zjednodušiť a urýchliť výrobný proces. Jednou z možností je konfigurácia s priamym krídlom využívajúcim profil Clark Y. Návrh tohto UAV je znázornený na obrázku č. 5 uprostred. Tento variant síce vyžaduje robustnejšie nosníky z dôvodu absencie uzavretého krídla plniaceho zároveň funkciu vonkajšieho vystuženia. Tieto nosníky by mohli jednoducho prechádzať naprieč celým trupom. Spracovanie konštrukčných dielov pomocou odporovej rezačky by bolo výrazne jednoduchšie. Rovnako aj potahovanie balzovým drevom by bolo menej náročné a rýchlejšie.



Obrázok 5 Možné budúce verzie VTOL UAV [Zdroj: autor]

Ďalší variant je znázornený na obrázku č. 5 v strede. Tento návrh by umožnil dosiahnutie najvyššej rýchlosti letu. V tomto usporiadaní je uhol medzi osou rotorov a nastavením krídla rovný 0° . Zároveň by bol náročnejší na pilotáž pri prechode z vertikálneho na horizontálny režim. V porovnaní s našim postaveným prototypom, ktorý stačí naklopiť do 40° a následne zvyšovať rýchlosť, v prípade tejto verzie by bolo potrebné naklopiť lietadlo o takmer 90° . Z tohto dôvodu navrhujeme využitie pokročilej riadiacej jednotky, ktorá by zabezpečila zmenu režimu letu, prípadne úplne autonómny let. Tento variant zároveň počíta s použitím šípovitého krídla s väčším vzopätím, čo má za cieľ zvýšiť stabilitu.

10. Záver

V súčasnosti je využívanie multikoptér vďaka ich schopnostiam vertikálneho vzletu a pristátia bežnou praxou. Avšak integrácia pasívne generovaného vztlaku prostredníctvom krídla do týchto

UAV predstavuje potenciál na výrazné zlepšenie ich výkonnostných charakteristík, ako aj rozšírenie ich aplikácií v rôznych oblastiach. Krídlo umožňuje efektívnejší let UAV v horizontálnom letovom režime, čím sa zvyšuje energetická účinnosť a predlžuje vytrvalosť.

Ďalšie potenciálne vylepšenia môžu zahŕňať použitie pokročilejšej riadiacej jednotky vybavenej GPS (Global Positioning System), väčšou pamäťou a funkciami, ako je napríklad RTH (Return to Home), ktorý zabezpečuje bezpečný automatický návrat UAV na miesto vzletu pri strate signálu alebo nízkej úrovni batérie. Jednou z možností je využitie ArduPilot, open-source autopilotového systému, ktorý umožňuje autonómne riadenie UAV. Napriek tomu riadiaca jednotka KK2.1.5 zvolená pre náš letún je v prvotných fázach vývoja lepšou voľbou, keďže je jednoduchšia a ideálna pre testovacie prototypy, hlavne kvôli rýchlemu programovaniu a nízkej obstarávacej cene. Pre pokročilejšie lety a zjednodušenie pilotovania letúna, by však bola vhodnejšia jednotka Pixhawk. Ďalšou možnosťou úprav a vylepšení sú aj modifikácie krídiel. Zjednodušenie krídla pre rýchlejšiu stavbu, alebo vytvoriť verziu pre vysokorýchlostné lety. Príklady, ako by tieto vylepšenia mohli vyzerieť, sú zobrazené na obrázku č. 5. Tento letún má potenciál inšpirovať ďalší vývoj podobných UAV VTOL. Je možné, že v budúcnosti budú mať kvadrokoptéry možnosť pripojiť krídla, ktoré by zlepšili aerodynamickú výkonnosť. Takýto jednoduchý princíp môže mať veľký vplyv na vytrvalosť, dolet, ale aj bezpečnosť UAV. Na základe vykonaných testovacích letov s UAV konvertoplánom a simulácií je zrejmé, že tento typ lietadla má výrazný potenciál pre aplikácie v rôznych oblastiach použitia. Jeho schopnosť vykonávať vertikálny vzlet, plynulý prechod na horizontálny let a následné vertikálne pristátie naznačuje, že by bol ideálny pre úlohy, ktoré vyžadujú vzlet bez vzletovej a pristávacej dráhy, vysokú presnosť manévrovania a zároveň schopnosť pokryť väčšie vzdialenosti.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

- [1] STŘÍTEŇSKÝ, O.- PRŮŠA, J.- BACH, M. 2019. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. 2019, Praha: Prusa Research a.s.
- [2] HATÁR, Ľ. rok. 3D tlačiarne RepRap. [online]. Nitra: SPU. 8 s. [navštívené: 2025-02-02]. Dostupné na: <<https://spu.fem.uniag.sk/mvd2016/proceedings/sk/articles/hatar.pdf>>
- [3] 3D LabPrint. Materials for 3D printing planes. [online]. [navštívené: 2025-02-02]. Dostupné na: <<https://3dlabprint.com/faq/materials-for-3d-printing-planes/>>



OPTIMALIZÁCIA LETOVÝCH TRATÍ S CIEĽOM ZNIŽOVANIA SPOTREBY PALIVA A EMISÍ

Emília Alexandra Ďurčo
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Frederik Chodelka
AirExplore
Krajná 29
821 04 Bratislava

Abstract

The main goal of this study outlines theoretical framework of air traffic routes with a particular focus on the Free Route Airspace (FRA) concept. In this paper we will examine the implementation and development of FRA within Europe, specific emphasis will be given on application of this concept in the Slovak Republic, as well as relevant national initiatives. The practical component presents a comparative analysis between conventional route planning and FRA based planning on theoretical basis. Methodology used in this paper evaluates the potential of FRA in fuel optimizing process. Preliminary findings show that even small reductions in fuel consumption can lead to a measurable positive impact on environmental sustainability.

Keywords

Airways, FRA, Free Route Airspace, optimalization, fuel efficiency

1. Úvod

Odvetvie leteckej dopravy patrí medzi najdynamickejšie sa rozvíjajúce odvetvia dopravy a od svojich počiatkov prešlo výrazným vývojom. Pôvodne bola letecká doprava využívaná najmä na prepravu zásielok, neskôr sa rozšírila o osobnú i nákladnú dopravu inú ako poštovú. Zvyšujúci dopyt po službách leteckej dopravy priniesol potrebu definovať pevné letové trate, ktoré by zabezpečovali bezpečnosť a plynulosť prevádzky. Tradičné trate boli viazané na pozemné rádiové zariadenia, neskôr boli nahradené trasami RNAV, ktoré využívajú satelitnú navigáciu.

Každoročný nárast leteckej prevádzky nad Európou, ako aj nad inými časťami sveta, hlavne počas letnej sezóny, prináša so sebou tlak na kapacitu vzdušného priestoru. Pevne stanovené trate nedokážu efektívne zvládnuť nárast prevádzky a preto bolo potrebné implementovať nové riešenie, akým je napríklad koncept voľných letových tratí FRA (Free Route Airspace). Tento koncept umožňuje lietadlám plánovať si trasu voľne, medzi definovanými vstupnými a výstupnými bodmi jednotlivých FIR regiónov, využívajúcich tento koncept. V Európe je tento koncept vo veľkej miere implementovaný, no v regiónoch na blízkom východe jeho uplatnenie absentuje.

Cieľom vedeckého článku je analyzovať prínosy konceptu FRA z hľadiska úspory paliva a zníženia emisií skleníkových plynov, a poukázať na potrebu implementácie tohoto konceptu aj mimo európskeho priestoru.

2. Letecké trate – história a súčasnosť

V počiatkoch letectva nebola potreba riadenia letovej prevádzky, lety boli zriedkavé a z hľadiska využitia kapacity vzdušného priestoru nenáročné. V 20. rokoch 20. storočia začali vznikať prvé letecké spoločnosti, ich existencia bola však krátkodobá. Počas prvej svetovej vojny sa lietadla stali rýchlejšími a spoľahlivejšími a do tohoto obdobia datujeme aj

potrebu organizácie leteckej dopravy. Vojnové obdobie prinieslo pokrok v technike, navigácii aj vo výcviku posádok. V tomto období začali vznikať prvé definované letové trate a kontrolné veže. Navigácia bola spočiatku vizuálna, porovnávaním známych navigačných prvkov na zemi a na mape, využíval sa aj princíp dead reckoning – určovanie polohy na základe smeru a rýchlosti. Zásadný pokrok nastal po druhej svetovej vojne zavedením rádiomajákov VOR, ktoré umožňovali definovanie tratí na základe kurzov. Od 60. rokov minulého storočia sa všesmerové rádiomajáky VOR stali základom pre navigáciu a letové trate sa začali postupne a systematicky budovať. [1] [2] [3]

Moderné letové trate nazývané ATS routes slúžia na usmerňovaní toku letovej prevádzky, pre potreby riadenia letovej prevádzky a pre poskytovanie letových prevádzkových služieb. Každá takáto trať je definovaná kurzom, dĺžkou a minimálnou výškou, tieto údaje sú publikované v Letovej informačnej príručke (AIP) daného štátu. Lety podľa pravidiel IFR (Instrument Flight Rules) začínajú SID (Standard Instrument Departure) odletovou traťou, pokračujú cez en-route segment až po STAR (Standard Terminal Arrival Route) príletovú trať na letisko príchodu. Každá letová trať je definovaná preponou, číslom a príponou. Vysvetlenie prepony môžeme vidieť v tabuľke číslo 1, prípona pri označovaní sa využíva na identifikovanie poskytovaných služieb a úrovne výkonnosti potrebnej pre vykonanie letu po takejto trati. Najčastejšie sa ako prípony využívajú písmena F a G, kde F sa používa pre označenie trate, kde na celej jej dĺžke alebo jej časti je poskytovaná iba poradenská služba. (advisory service). Písmeno G sa používa na označenie letovej cesty na ktorej sa v celom jej rozsahu alebo na jej časti využíva letová informačná služba FIS (flight information service).

Systém letových tratí v SR je naviazaný na okolité krajiny, pričom niektoré z nich už využívajú koncept FRA. Každá trať má publikované hodnoty ako MEA (minimálna výška), MAA

(maximálna výška), MTCA (minimálna výška nad terénom) a iné, čo umožňuje bezpečný a efektívny let. [4] [5] [6]

	REGIONÁLNA TRATĚ	RNAV TRATĚ
A, B, G, R	áno	nie
L, M, N, P	áno	áno
H, J, V, W	nie	nie
Q, T, Y, Z	nie	áno

Tabuľka 7 Predpony pre označovanie letových tratí

3. Typy priletových a odletových tratí

Priletové a odletové trate slúžia na zabezpečenie bezpečnej, plynulej a efektívnej prevádzky lietadiel v okolí letísk. Návrh takýchto tratí musí byť v súlade s bezpečnostnými štandardami, berúc v úvahu okolitý terén, množstvo prevádzky na danom letisku, typ lietadiel využívajúci letisko či dostupné navigačné zariadenia. V súčasnosti je veľký dôraz pri konštrukcii takýchto tratí kladený na hlukové obmedzenie, nakoľko sa veľa letísk nachádza v tesnej blízkosti nasídlených oblastí.

Odletové trate SID (Standard Instrument Departures) slúžia na vedie odlietajúcich lietadiel z dráhy vzletu až k prvému bodu letovej trasy. Delia sa na konvenčné trate, využívajúce zariadenia ako VOR alebo NDB a RNAV trate, využívajúce GPS signál. Konvenčné trate vyžadujú správne naladenia palubných prístrojov, orientáciu podľa kurzov, radiálov a vzdialeností od pozemných rádionavigačných staníc. RNAV trate využívajú body definované zemepisnými súradnicami, zadané do palubných počítačov. [7] [8] [9]

Priletové trate STAR (Standard Terminal Arrival Route) slúžia na bezpečné vedenie lietadiel z en-route segmentu až po bod počiatočného priblíženia. Rovnako ako SID aj STAR existujú vo forme konvenčných tratí alebo RNAV tratí, navyše pri STAR rozlišujeme otvorené a uzavreté trate. Uzavreté priletové trate sú trate, ktoré začínajú na rádionavigačnom zariadení alebo hlásnom bode a končia v bode FAF (final approach fix), bod konečného priblíženia, celá procedúra je tak neprerušovaná a lietadlo je z letovej cesty dovedené priamo do bodu konečného priblíženia. Otvorená priletová trať je trať, ktorá začína na rádionavigačnom zariadení alebo hlásnom bode a končí na bode, ktorý sa nachádza po vetre dráhy v používaní. Po tomto bode pilot pokračuje posledným kurzom, po ktorom je očakávané radarové navádzanie riadiacim letovej prevádzky do úseku konečného priblíženia. [8]

Na záver existujú špecifické prevádzkové postupy kedy nie je definovaná ani priletová ani odletová trať. Príkladom je egyptské letisko Mersa Matruh (HEMM), kde sú odlety aj prílety vykonávané spravidla pomocou radarového navádzania alebo tzv. vektorovania na priblíženie.

4. Typy priblížení na pristátie

Typy priblížení na pristátie závisia predovšetkým od aktuálnych meteorologických podmienok a podľa toho či sa letu vykonáva podľa pravidiel za viditeľnosti zeme VRF (Visual Flight Rules) alebo podľa pravidiel podľa prístrojov IFR (Instrument Flight

Rules). Základné kategórie priblížení sú následne dve, a to vizuálne priblíženie a prístrojové priblíženie.

Vizuálne priblíženie je typ priblíženia, ktoré sa vykonáva za priaznivých meteorologických podmienok a podľa VFR pravidiel. Pilot má počas celého manévru vizuálny kontakt so zemou a nepotrebuje používať žiadne navigačné zariadenia. Vizuálne priblíženie môže byť priame alebo v podobe letového okruhu (circle to land), čo je časté najmä na menších letiskách.

Prístrojové priblíženie je typ priblíženia, ktoré sa používa za zhoršených meteorologických podmienok, bez vizuálneho kontaktu so zemou. Let je vykonávaný podľa pravidiel IFR, pričom posádka sa spolieha na palubné a pozemné navigačné systémy. Prístrojové priblíženia sa delia na:

- **2D priblíženia** – poskytuje len informácie o horizontálnej polohe. Vertikálna poloha sa určuje na základe vopred definovaných bodov (fixov) a tabuliek. Patria sem typy ako VOR, NDB, LOC a RNAV. Vzhľadom na obmedzenú možnosť okamžitej korekcie vertikálnych odchýlok ide o menej presnú metódu priblíženia v porovnaní s presnými priblíženiami, ktoré poskytujú nepretržité údaje o vertikálnej aj horizontálnej polohe. Takéto priblíženie zvyšuje pracovnú záťaž posádky a vyžaduje väčšiu mieru situačného povedomia.
- **3D priblíženia** – poskytuje kontinuálne informácie o horizontálnom aj vertikálnom navádzaní. Piloti môžu plynulo korigovať smer aj výšku letu. Medzi tieto typy patrí ILS, GBAS, MLS a PAR. Presné priblíženia sa ďalej delia na tri kategórie podľa výšky rozhodnutia (DH) a dohľadnosti (RVR):
 - Kategória I: DH $\geq$ 200 ft, RVR $\geq$ 550 m
 - Kategória II: DH 100–199 ft, RVR $\geq$ 300 m
 - Kategória III: DH < 100 ft, RVR < 300 m

Výška rozhodnutia je výška, v ktorej musí posádka buď vizuálne identifikovať dráhu a pokračovať v priblížení, alebo zahájiť nezdarené priblíženie. [10] [11] [12] [13]

5. Free Route Airspace

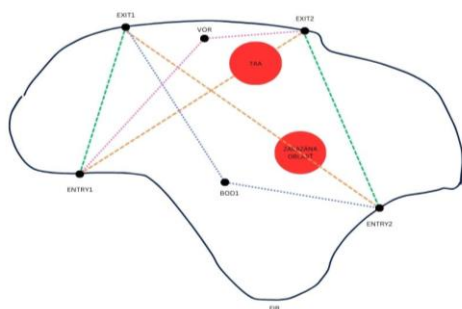
Letecká doprava zaznamenáva dlhodobý rastúci trend, čo kladie vysoké nároky na kapacitu vzdušného priestoru a jeho efektívne riadenie. Pre uľahčenie plánovania, zníženie nákladov a zvýšenie efektivity prevádzky bol v Európe zavedený koncept Free Route Airspace (FRA) – voľného vzdušného priestoru. Ten umožňuje lietadlám plánovať trasy nezávisle od tradičných, pevne stanovených letových ciest.

Koncept vznikol v roku 2007 ako iniciatíva niekoľkých štátov a poskytovateľov navigačných služieb. O rok neskôr bol začlenený do Flight Efficiency Planu, ktorý vypracovali IATA a Eurocontrol. Nariadenie Európskej komisie č. 716/2014 stanovilo cieľ zaviesť FRA vo všetkých európskych krajinách do 1. januára 2022.

Koncept FRA je navrhnutý tak, aby umožnil užívateľom plánovať letové trasy s využitím vstupných a výstupných bodov jednotlivých oblastí FIR, bez nutnosti dodržiavať pevne stanovené a definované letové cesty. Voľná trať však má určité obmedzenia, a to napríklad zákaz preletu cez zakázané oblasti,

oblasti TAA (Terminal Arrival Area), teda cez oblasti finálneho priblíženia, alebo oblasti uvedené v AUP (Airspace Use Plan). Ak by bol let plánovaný cez takéto zakázané alebo obmedzené oblasti, je nutné aby prevádzkovateľ zvolil medziľahlý bod, ktorým je možné sa takýmto oblastiam vyhnúť. Tieto body môžu byť definované pomocou navigačných zariadení ako VOR alebo RNAV súradníc.

Pre lepšie pochopenie fungovania tvorby trate vo FRA slúži Obrázok 1. Každý FIR má určené vstupné a výstupné body, medzi ktorými sa väčšinou plánuje priama trať. Ak však takáto trať pretína zakázanú alebo inak obmedzenú oblasť, je potrebné použiť medziľahlý bod – RNAV bod definovaný súradnicami alebo navigačným zariadením (napr. VOR). Na obrázku je zobrazená trať z bodu ENTRY2 do EXIT1, ktorá pretína zakázanú oblasť, preto sa pridáva medziľahlý bod BOD1. Trate, ktoré takéto obmedzenia nerešpektujú (ako tie označené oranžovou na Obrázku 1), by boli systémom IFPUV zamietnuté (systém slúžiaci na validáciu letových plánov EUROCONTROLOM).



Obrázok 1 Tvorba trate v priestore FRA

Výhody konceptu FRA zahŕňajú skrátenie doby letu, zníženie spotreby paliva a emisií CO₂, zníženie konfliktných situácií vďaka využívaniu väčšej časti vzdušného priestoru, optimalizácia hmotnosti lietadla, pretože je možné vziať menej paliva, čím sa zvýši užitočný náklad. Napriek výzvam a technickým komplikáciám je Free Route Airspace vnímaný ako dôležitý krok k modernej, efektívnej a ekologickej leteckej doprave v rámci Európy. [14] [15] [16]

6. FRA v prostredí slovenského vzdušného priestoru

Koncept voľných letových tratí sa v posledných rokoch výrazne rozvinul aj vo vzdušnom priestore Slovenskej republiky. Od apríla roku 2016 môžu užívatelia plánovať svoje lety vo FIR Bratislava bez viazanosti na pevné letové trate, ak sa takéto let vykonáva vo výške 7500 m a viac. Dôležitým míľnikom pre Slovensko bol 6. december 2018, kedy vstúpilo do iniciatívy SEEN FRA (South East Europe Night Free Route Airspace). Tento projekt vznikol spojením nasledovných voľných vzdušných priestorov: BULATSA (Bulharsko), HUNGAROCNTRON (Maďarska) a ROMATSA (Rumunsko). V rámci SEEN FRA bolo užívateľom umožnené plánovanie tratí bez ohľadu na štátne hranice.

V roku 2022 sa k tejto iniciatíve pripojila Moldavská republika, o rok neskôr aj Česká republika. Od roku 2023 je koncept poskytovaný na báze 24/7 a pokrýva vzdušné priestory

Bulharska, Maďarska, Slovenska, Česka, Rumunska a Moldavska. Spojením menovaných vzdušných priestorov vznikol jeden z najväčších blokov voľného vzdušného priestoru v Európe s názvom SEEFRA. Na obrázku číslo 2 môžeme vidieť aktuálnu oblasť SEEFRA a zároveň stále sa rozširujúcu iniciatívu BALTIC FRA. Ak by vzniklo prepojenie týchto dvoch iniciatív, plánovanie trati vo voľnom vzdušnom priestore bez rešpektovania štátnych hraníc by bol možný od Čierneho mora až po Baltské more. Rozvoj FRA konceptu tak podporuje efektívne využitie vzdušného priestoru v čase jeho kapacitného preťaženia. [17] [18] [19]



Obrázok 2 Oblasť SEEFRA v roku 2023

7. Palivová efektívnosť v lete: prevádzkové stratégie

Letecká doprava predstavuje jeden z pilierov moderného hospodárstva a globálnej konektivity – prepája krajiny, podporuje obchodné vzťahy, cestovný ruch aj medzinárodnú spoluprácu. S jej dynamickým rozvojom však narastajú aj výzvy, medzi ktoré patrí najmä vysoká spotreba paliva. Tá nepredstavuje len finančnú záťaž pre letecké spoločnosti, ale zároveň významne prispieva k emisiám skleníkových plynov, čím sa civilné letectvo podieľa na prehľbovaní klimatickej krízy.

Práve preto sa otázka zvyšovania palivovej efektívnosti dostáva do popredia záujmu odborníkov, výrobcov lietadiel aj prevádzkovateľov letov. Kým vývoj nových, úspornejších technológií je behom na dlhé trate, viaceré okamžité opatrenia možno realizovať už dnes – najmä prostredníctvom optimalizácie prevádzkových postupov. Táto kapitola sa zameriava na konkrétne stratégie a techniky, ktoré môžu prispieť k zníženiu spotreby paliva počas jednotlivých fáz letu.

Medzi základné prevádzkové stratégie patria nasledovné:

a) Optimalizácia extra paliva

Dodatočné palivo, známe ako „discretionary fuel“, je častým nástrojom pilotov pre zvládanie nepredvídateľných situácií. Avšak, bez primeranej kontroly vedie k nadmernej hmotnosti a tým aj k vyššej spotrebe paliva. Zavedenie limitov na maximálne povolené množstvo tohto paliva motivuje posádky optimalizovať plánovanie a zároveň znižuje zbytočnú záťaž lietadla.

b) Engine-Out Taxi (pred a po lete)

Jednoduchý, ale účinný spôsob úspory paliva spočíva vo vypnutí jedného z motorov počas rolovania – či už pred vzletom (taxi-out), alebo po pristátí (taxi-in). Pri dlhšom rolovaní môže tento postup ušetriť desiatky kilogramov paliva. V prípade pravidelného používania v rámci flotily predstavuje významný potenciál úspor.

c) Rolling take-off a optimalizácia vztlakových mechanizmov

Vykonanie vzletu bez zastavenia (tzv. rolling take-off) skracuje čas strávený na dráhe a zároveň znižuje spotrebu. Rovnako dôležité je aj použitie nižšieho stupňa klapiek pri vzlete, čím sa znižuje odpor a tým aj spotreba paliva.

d) Znížená akceleračná výška

Skoršie zatiahnutie vztlakovej mechanizácie a redukcia ťahu motorov po vzlete vedie k efektívnejšiemu prechodu do režimu stúpania. Táto technika je vhodná najmä mimo oblastí s prísnyimi hlukovými obmedzeniami a môže výrazne ovplyvniť spotrebu v počiatočnej fáze letu.

e) Optimalizácia letovej hladiny a trasy

Počas letu je možné na základe aktuálnych meteorologických údajov optimalizovať letovú hladinu alebo trať. Zmena letovej výšky kvôli výhodnejšiemu vetru alebo vyhnutiu sa turbulenciám, ako aj využitie priamych tratí, znižujú dĺžku letu a tým aj množstvo spaľeného paliva.

f) Kontinuálne klesanie (CDA) a vizuálne priblíženia

Klesanie s ťahom motorov nastaveným na voľnobeh predstavuje palivovo najefektívnejší spôsob prípravy na pristátie. Skoré alebo oneskorené začatie klesania voči vypočítanému bodu (TOD) výrazne znižuje efektívnosť. Vhodným doplnkom je aj priame alebo vizuálne priblíženie, ktoré skracuje dĺžku trate.

g) Využitie pozemného zdroja a APU management

Po pristátí by sa mala pomocná pohonná jednotka (APU) využívať len v nevyhnutných prípadoch. Napojenie lietadla na pozemný zdroj elektrickej energie dokáže výrazne znížiť spotrebu paliva, keďže APU môže spotrebovať vyše 100 kg paliva za hodinu.

Efektívne využitie paliva teda nie je len ekonomickou, ale predovšetkým ekologickou výzvou, ktorej zvládnutie je nevyhnutným predpokladom pre udržateľný rozvoj letectva v 21. storočí. [14] [20] [21]

8. Metodológia pre optimalizačnú techniku

V rámci praktickej časti výskumu bola zvolená konkrétna letová trasa, ktorá poskytla vhodný základ pre analýzu existujúcich letových tratí v medzinárodnom vzdušnom priestore a pre simuláciu ich optimalizácie prostredníctvom konceptu Free Route Airspace (FRA). Výber trasy zohľadňoval potrebu preletu cez rôzne FIR oblasti, z ktorých niektoré už FRA implementujú (napr. krajiny EÚ), zatiaľ čo iné (napr. Turecko, Saudská Arábia) ešte stále využívajú prevažne konvenčné štruktúrované trate.

Vybraný let sa uskutočnil z medzinárodného letiska Milana Rastislava Štefánika v Bratislave (LZIB) na medzinárodné letisko Salalah v Ománe (OOSA). Let bol realizovaný 18. januára 2025 leteckou spoločnosťou Smartwings pod číslom letu 6628. Ako dopravný prostriedok bol použitý moderný stroj typu Boeing 737-800 MAX, ktorý predstavuje technologicky pokročilé riešenie so zníženou spotrebou paliva, emisiami aj hlukovou stopou v porovnaní so svojimi predchodcami. Tento typ lietadla je vďaka vyššej palivovej efektívnosti a nižším prevádzkovým nákladom ideálnym kandidátom pre štúdiu zameranú na ekologickú a ekonomickú udržateľnosť letectva.

Na analýzu a porovnanie letových tratí bol použitý operation flight plan (OFP) generovaný navigačným oddelením spoločnosti. OFP slúži ako kľúčový dokument pre plánovanie a priebeh letu – obsahuje detailné informácie o letovej trase, palive, váhach, čase a spotrebe na jednotlivých prelietavaniach bodoch. Plán je počas letu priebežne aktualizovaný posádkou a využívaný ako nástroj monitorovania reálneho priebehu letu.

Pre potreby optimalizácie a simulácie ideálnej trate bol použitý softvér SimBrief, ktorý umožňuje vytvárať digitálne letové plány na základe zadaných vstupných parametrov. Táto aplikácia je používateľsky prívetivá a zároveň dostatočne robustná na to, aby poskytla verný obraz o alternatívnej, potenciálne optimalizovanej letovej trati. Pomocou SimBrief bola vytvorená trať založená na predpoklade plnej implementácie konceptu FRA v celej prelietavanej trase, a to aj v oblastiach, kde v reálnych podmienkach tento koncept nie je zatiaľ zavedený. Simulácia porovnáva dve varianty letovej trasy:

- Originálna trať podľa reálneho OFP, ktorá reflektuje súčasný stav vzdušného priestoru, vrátane používania štandardných navigačných bodov (VOR/NDB) a konvenčných tratí;
- Optimalizovaná trať, vytvorená v SimBrief, predpokladajúca plnú implementáciu FRA vo všetkých FIR oblastiach, v ktorých by to bolo technicky a prevádzkovo možné.

V analytickej časti práce budú obe varianty porovnané z hľadiska troch hlavných parametrov: celková dĺžka trate (v NM), predpokladaná doba letu, spotreba paliva.

Porovnanie bude vykonané na úrovni jednotlivých FIR oblastí, cez ktoré let prechádzal. V každej z týchto oblastí sa bude skúmať, či bol v pôvodnom pláne uplatnený koncept FRA, a ak nie, aký by bol potenciálny prínos jeho aplikácie. V prípadoch, kde boli identifikované obmedzenia ako napr. zakázané vojenské zóny, nedostatočné radarové pokrytie alebo iné prevádzkové faktory, boli tieto skutočnosti zohľadnené v rámci simulácie a optimalizácie.

Výsledky z aplikácie SimBrief budú následne graficky a tabuľkovo spracované. Hlavným cieľom tejto analýzy je kvantifikovať prínosy plynúce z implementácie konceptu FRA – najmä v oblasti úspory paliva, zníženia emisií a časovej efektivity letu.

Je potrebné zdôrazniť, že táto optimalizácia má čisto teoretický charakter. Simulácia vychádza z predpokladu, že FRA by bolo možné uplatniť v každej prelietavanej oblasti, čo však v reálnej praxi nie je možné z dôvodu obmedzení spomenutých vyššie.

Napriek tomu takáto modelová situácia slúži ako dôležitý dôkazový rámec o potenciálnych výhodách, ktoré môže koncept FRA priniesť v budúcnosti.

Celkovým prínosom tejto metodológie je vytvorenie praktického modelu, na základe ktorého možno demonštrovať význam a efektivitu FRA nielen v európskom vzdušnom priestore, ale aj v širšom globálnom kontexte. Vedecký článok si tak kladie za cieľ poukázať na potrebu rozširovania FRA konceptu, ktorý predstavuje krok smerom k udržateľnej, uhlíkovo neutrálnej a palivovo efektívnej leteckej doprave.

9. Východisková situácia a jednotlivé porovnania

Východiskom skúmania je reálny let z Bratislavy do Salalah, pričom v častiach trasy bola použitá sieť voľných letových tratí (Free Route Airspace – FRA) a inde štandardné RNAV trate. Pre účely optimalizácie bola vytvorená ideálna trať využívajúca FRA naprieč celou trasou. Cieľom je ukázať prínosy konceptu FRA v skrátaní trate, znížení spotreby paliva, emisií a letového času. Letový plán bol vytvorený v aplikácii SimBrief na základe reálnych údajov, pričom ďalšia analýza porovnáva pôvodnú a optimalizovanú trať v jednotlivých letových informačných oblastiach. Výstup z aplikácie môžeme vidieť na nasledovnom obrázku a predstavuje východiskovú situáciu dôležitú pre optimalizáciu letových tratí v jednotlivých prelietavaných FIR regiónoch.

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKOW (BRNO)	182 (15,528 kg)	80,967 kg	81,367 kg	C130	2,919 nm	+40 kts	06:06:00	13,677 kg	6,703 kg	2,230 kg	20,309 kg	None

Obrázok 3 Východiskové údaje pre optimalizáciu - pôvodný OFP plán

LHCC FIR (Maďarsko): Optimalizáciou trasy zrušením bodu SIRDU sa podarilo skrátiť trať o 15 NM, čo viedlo k úspore paliva približne 75 kg a skrátaniu letu o 2 minúty.

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKOW (BRNO)	182 (15,528 kg)	80,967 kg	81,367 kg	C130	2,919 nm	+40 kts	06:06:00	13,677 kg	6,703 kg	2,230 kg	20,309 kg	None

Obrázok 4 Pôvodná a optimalizovaná trať v LHCC

LYBA a LBSR FIR (Srbsko a Bulharsko): V týchto vzdušných priestoroch bol FRA koncept využitý, neexistoval priestor pre optimalizáciu, a preto nebola dosiahnutá žiadna úspora paliva.

LGGG FIR (Grécko): Aj keď sa vzdialenosť trasy nezmenila (77 NM), aplikácia FRA konceptu priniesla malú úsporu 3 kg paliva



Obrázok 5 Pôvodná a optimalizovaná trať v LGGG bez zmeny času.

LTBB FIR (Turecko – Istanbul): Hoci FRA zatiaľ nie je implementovaný, modelová optimalizácia by skrátila trať o 2

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKOW (BRNO)	182 (15,528 kg)	80,967 kg	81,367 kg	C130	2,919 nm	+40 kts	06:06:00	13,677 kg	6,703 kg	2,230 kg	20,309 kg	None

Obrázok 6 Optimalizovaná letová trať v LTBB- výstup zo SimBrief NM a ušetrila 7 kg paliva, čo naznačuje potenciál úspor po zavedení FRA.

LTAA FIR (Turecko – Ankara): Optimalizácia nepriniesla zmenu v dĺžke trate, ale mierna úspora paliva o 1 kg bola zaznamenaná, zrejme vďaka efektívnejšiemu vetru.

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKOW (BRNO)	182 (15,528 kg)	80,967 kg	81,367 kg	C130	2,919 nm	+40 kts	06:06:00	13,677 kg	6,703 kg	2,230 kg	20,309 kg	None

Obrázok 7 Optimalizovaná letová trať v LTAA- výstup zo SimBrief

LCCC FIR (Cyprus): Po zavedení druhej fázy FRA (NICFRA) od 20. februára 2025 bude možné trasu skrátiť o 1 NM, čo predstavuje úsporu 3 až 5 kg paliva.

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKOW (BRNO)	182 (15,528 kg)	80,967 kg	81,367 kg	C130	2,919 nm	+40 kts	06:06:00	13,677 kg	6,703 kg	2,230 kg	20,309 kg	None

Obrázok 8 Optimalizovaná letová trať v LCCC- výstup zo SimBrief

LLLL FIR (Izrael a Palestína): Vzhľadom na obmedzenia a konflikt nie je FRA povolený. Trasa zostáva fixná (78 NM) a SimBrief evidoval mierne zvýšenie spotreby paliva o 1 kg.

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKOW (BRNO)	182 (15,528 kg)	80,967 kg	81,367 kg	C130	2,919 nm	+40 kts	06:06:00	13,677 kg	6,703 kg	2,230 kg	20,309 kg	None

Obrázok 9 Optimalizovaná letová trať v LLLL- výstup zo SimBrief

OJAC FIR (Jordánsko): Let prebiehal po fixnej RNAV trati bez

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKOW (BRNO)	182 (15,528 kg)	80,967 kg	81,367 kg	C130	2,919 nm	+40 kts	06:06:00	13,677 kg	6,703 kg	2,230 kg	20,309 kg	None

Obrázok 10 Optimalizovaná letová trať v OJAC- výstup z aplikácie SimBrief

možnosti optimalizácie. FRA koncept nie je v krajine implementovaný ani plánovaný.

OEJD FIR (Saudská Arábia): Koncept FRA je dostupný len v juhovýchodnej časti Jeddah FIR. Pôvodná trať merala dĺžku 1151 NM, 380 NM z toho bolo plánovaných v súlade s konceptom FRA. Po optimalizovaní trate sa dĺžka skrátila na 1137 NM, čo činí úsporu 14 NM. Podľa softvéru SimBrief je

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKOW (BRNO)	182 (15,528 kg)	80,967 kg	81,367 kg	C130	2,919 nm	+40 kts	06:06:00	13,677 kg	6,703 kg	2,230 kg	20,309 kg	None

Obrázok 11 Optimalizovaná letová trať v OEJD- výstup z aplikácie SimBrief

úspora na tomto úseku 87 kilogramov paliva a skrátanie dĺžky letu o 2,5 minúty.

OOMM FIR (Omán): FRA koncept v ománskom vzdušnom priestore nie je aplikovaný, pôvodná trať merala dĺžku 177 NM, optimalizovaná trať by merala 117 NM, nie je možné túto trať použiť z dôvodu aktivovaného obmedzeného priestoru z dôvodu prebiehajúcich vojenských cvičení. Úspora paliva je v tomto úseku teda nulová.

10. Záverečné výsledky meraní

Optimalizáciou letovej trate medzi bodmi VAMOG a ASTUN pomocou konceptu voľných letových tratí sa dosiahla úspora 32

námorných míľ, čo predstavuje zníženie spotreby paliva o 163 kg a emisií CO₂ o 515 kg na jeden let. Pri ôsmich letoch mesačne ide o mesačnú úsporu 1 304 kg paliva a 4 121 kg CO₂. Výsledky ukazujú, že aj malé zmeny v jednotlivých FIR môžu viesť k významným ekologickým prínosom a potvrdiť prínos konceptu FRA k efektívnejšiemu a udržateľnejšiemu letectvu. Aj keď sa úspora paliva a skrátenie dĺžky trate mohla zdať na prvý pohľad v jednotlivých oblastiach malá, celková úspora paliva a emisií je v konečnom výsledku markantná.

Referencie

[1] History of air traffic control. [Online] Dostupné na: <https://www.highlander.io/post/history-of-air-traffic-control>.

[2] Navigation: From Dead Reckoning to Navstar GPS. [Online] Dostupné na: <https://www.airandspaceforces.com/article/1284navigation/>.

[3] Very High Frequency Omni-directional Ranging. [Online] Dostupné na: <https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept--Unpacked/PBN-Infrastructure/Ground-based-NAVAIDs/VOR.html>.

[4] ATS Route. [Online] Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/ats-route>.

[5] HAŇO, T. Návrh tratí letových prevádzkových služieb. [bakalárska práca]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta, Katedra letovej prípravy, 2020.

[6] Identification of ATS routes [Online] Dostupné na: https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/Identification_of_ATS_routes.

[7] SID-Standard Instrument Departure. [Online] Dostupné na: <https://knowledgebase.vatsim-germany.org/books/ifr-lhx/page/sid-standard-instrument-departure>.

[8] NOVÁK, D. Návrh a optimalizace RNAV SID a STAR tratí na letišti Leoše Janáčka Ostrava. [diplomová práca]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov, Katedra leteckej dopravy, 2013.

[9] Conventional vs RNAV SIDs. [Online] Dostupné na: <https://aviationsim.uk/conventional-vs-rnav-sids/>.

[10] SLUK, T. Možnosti riešenia postupov prístrojového priblíženia na malé letisko s využitím satelitných navigačných systémov. [diplomová práca]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta, Katedra letovej prípravy, 2014.

[11] TYMOVČAK, M. Priblíženie na pristátie s využitím družicových navigačných systémov. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta Košice, 2023.

[12] KONTRA, L. Analýza využitia pozemných rádionavigačných zariadení v civilnom letectve. [bakalárska práca]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov, Katedra leteckej dopravy, 2024.

[13] Guide to Aviation Approaches: Types and Technologies Explained. [Online] Dostupné na: <https://www.aviationhunt.com/aviation-approaches/>.

[14] Fuel consumption optimization in air transport: a review, classification, critique, simple meta-analysis, and future research implications. [Online] Dostupné na: <https://etrr.springeropen.com/articles/10.1007/s12544-015-0160-x>.

[15] Free Route Airspace (FRA). [Online] Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/free-route-airspace-fra>.

[16] Free route airspace. [Online] Dostupné na: <https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace>.

[17] Flying over Slovakia is getting greener. [Online] Dostupné na: <https://www.lps.sk/en/press-centre/news>.

[18] Republic of Moldova joins SEE FRA. [Online] Dostupné na: <https://www.lps.sk/en/press-centre/news>.

[19] Czech Republic joins SEE FRA. [Online] Dostupné na: <https://www.lps.sk/en/press-centre/news>.

[20] 22 eco-flying practices for flight ops. [Online] Dostupné na: <https://blog.openairlines.com/22-fuel-efficiency-procedures-for-flight-ops>.

[21] Pilot discretionary fuel... justified extra fuel or unjustified extra cost? [Online] Dostupné na: <https://www.navblue.aero/pilot-discretionary-fuel-justified-extra-fuel-or-unjustified-extra-cost/>.



PRÍNOS NOVÝCH MEDZINÁRODNÝCH DOHÔD O LETECKEJ DOPRAVE

Natália Fábryová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Alena Novák Sedláčková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This paper focuses on the analysis of the current state of international air transport agreements between the European Union and third countries, specifically Ukraine, Armenia, Tunisia, and Qatar. The primary objective was to assess clauses related to environmental, social aspects and fair competition in the context of current legislation and applied rules. The methods of document analysis, comparison and synthesis were used, evaluating specific provisions of these agreements and their impact on the air transport market. Based on the conducted analysis, it was concluded that the new agreements significantly contribute to the sustainable development of air transport within the EU, support the protection of employee rights, and create conditions for fair competition. The thesis also presents proposals for potential expansion of contractual cooperation between the EU and other third countries, assessing the potential benefits of these steps for the Slovak air transport sector. The aim of the thesis was fulfilled, and the results highlight the growing importance of a comprehensive approach to negotiating international air transport agreements.

Keywords

International agreements, Air transport, European Union, sustainability, fair competition.

1. Úvod

Cieľom článku je na základe analýzy súčasného stavu medzinárodných dohôd EÚ o leteckej doprave s tretími krajinami ako je Ukrajina, Arménsko, Tunis či Katar sa zamerať na doložky o environmentálnej, sociálnej a spravodlivej hospodárskej súťaže a následne vyhodnotiť, aký je prínos týchto dohôd pre EÚ a navrhnúť možné rozšírenie zmluvnej spolupráce medzi EÚ a ďalšími tretími krajinami v kontexte vyhodnotenia prínosu aj pre SR.

Teoretická časť článku sa venuje historickému vývoju medzinárodnej leteckej dopravy a vzniku regulačného rámca na základe Chicagského dohovoru z roku 1944. Analyzuje bilaterálne a multilaterálne dohody o leteckej doprave.

Analytická časť článku sa zameriava na proces uzatvárania dohôd o leteckej doprave medzi Európskou úniou a vybranými tretími krajinami, konkrétne Ukrajinou, Arménskom, Tuniskom a Katarom. Analyzovaná je aj problematika prístupu na trh, vlastníctva a kontroly leteckých spoločností, ako aj mechanizmy riešenia sporov medzi zmluvnými stranami. Záver analytickej časti obsahuje návrhy a odporúčania na efektívnejšiu tvorbu budúcich dohôd, so zameraním na rozšírenie zmluvnej spolupráce a podporu udržateľného rozvoja v letectve.

2. Medzinárodné dohody o leteckej doprave a ich význam pre trh leteckej dopravy

Základným dokumentom pre reguláciu letectva je Dohovor o medzinárodnom civilnom letectve, ktorý bol prijatý 7. decembra 1944. Ide o ustanovujúci legislatívny text procesu medzinárodnej leteckej dopravy a umožnil vytvorenie medzinárodného riadiaceho orgánu, ktorý dohliada na leteckú dopravu. Na základe tohto dohovoru bola zriadená Medzinárodná organizácia pre civilné letectvo (ICAO), ktorej hlavnou úlohou je zabezpečovať rozvoj medzinárodnej leteckej

dopravy, a to s ohľadom na jej bezpečnosť, pravidelnosť, účinnosť a hospodárnosť [1] [2].

Pred Chicagským dohovorom bola medzinárodná letecká doprava riadená bilaterálnymi rokovaniami medzi krajinami, ktoré si želali nezávisle kontrolovať svoj vlastný vzdušný priestor. To znamenalo, že územia mali jedinečné podmienky a požiadavky založené na vzájomnej dohode prepojených štátov, ekonomických alebo geopolitických záujmoch a ďalších. Tento nejednotný systém regulácie medzinárodnej leteckej dopravy neposkytoval dostatočnú ochranu suverenity štátov nad ich vzdušným priestorom a umožňoval neautorizované vstupy zahraničných lietadiel [3].

Chicagský dohovor je základným dokumentom, z ktorého vychádzajú všetky medzinárodné predpisy a normy v oblasti bezpečnosti civilného letectva. Dohovor zaviedol medzinárodné štandardy a odporúčané postupy (SARPs), ktoré regulujú navigáciu lietadiel, údržbu leteckej techniky, riadenie letovej prevádzky a bezpečnostné opatrenia. Takéto úspechy povolené dohovorom exponenciálne zvýšili bezpečnosť vďaka jednotnej spokojnosti naprieč hranicami a zároveň umožnili prudký rozmach rozvoja letectva po druhej svetovej vojne [4].

Chicagský dohovor bol teda základom pre súčasné bilaterálne dohody o leteckej doprave; ICAO tvrdí, že každá medzinárodná dohoda o leteckej doprave po roku 1945 odráža aspekty Chicagského dohovoru. Každá dohoda však obsahuje aspekty Chicagského dohovoru, čím sa stáva konzistentnou dohodou o kontinuite medzinárodnej leteckej dopravy. Dohovor uľahčil rastový potenciál leteckej dopravy tým, že usmernil takúto dohodu a zároveň vytvoril nové trhy. Stanovil regulačný rámec, ktorý umožnil efektívnosť a bezpečnosť v rámci medzinárodného leteckého trhu [5].

V 90. rokoch sa v Európe začal vyvíjať tlak na privatizáciu leteckej dopravy na zvýšenie konkurencie, čo viedlo k postupnej integrácii EÚ. Postupná liberalizácia sa následne prejavila aj do

liberalizácie medzinárodných zmluvných vzťahov s cieľom vytvoriť priestor pre voľnú konkurenciu. V roku 1992 bola uzatvorená prvá medzinárodná liberálna letecká dohoda o otvorenom nebi (Open Skies Agreement) medzi USA a Holandskom. K aprílu 2015 bolo podpísaných viac ako 3 500 liberálnych dohôd [6].

Európska únia ešte v roku 2015 prijala novú leteckú stratégiu pre Európu, ktorá kladie veľký dôraz na medzinárodné letecké dohody. Táto stratégia zdôrazňuje, že Európa musí byť vedúcim aktérom v medzinárodnej leteckej doprave a jednou z jej kľúčových priorít je vstup na rastúce trhy prostredníctvom zlepšovania služieb, prístupu na trh a investičných príležitostí s tretími krajinami, pričom zároveň zabezpečuje rovnaké podmienky. Taktiež uvádza, že EÚ by mala rozšíriť bilaterálne dohody o bezpečnosti a podporovať svetový obchod s lietadlami a súvisiacimi produktmi [6].

2.1. Bilaterálne dohody

Bilaterálne dohody o leteckej doprave sú medzinárodné dohody medzi dvoma zmluvnými stranami, ktoré regulujú leteckú dopravu medzi nimi. Tieto dohody môžu zahŕňať rôzne aspekty, ako sú frekvencie letov, typy lietadiel, ktoré môžu byť použité, a dokonca aj ceny leteniek. Tieto dohody umožňujú leteckým spoločnostiam vykonávať pravidelnú obchodnú leteckú dopravu medzi signatárskymi krajinami. Je dôležité poznamenať, že tieto dohody musia byť v súlade s právom Európskeho spoločenstva, aby sa vytvoril pevný právny základ pre letecké dopravné služby medzi Európskym spoločenstvom a tretími krajinami [7] [8].

Prvé bilaterálne dohody z roku 1945 položili základ pre budúce dohody o medzinárodnom riadení vzdušného priestoru a odštartovali technologické inovácie a vylepšenia, ktoré významne ovplyvnili rozvoj medzinárodnej leteckej dopravy v nasledujúcich desaťročiach. Išlo o významný vývoj v environmentálnych aj sociálnych programoch, pretože sa tým stanovilo nielen to, ako sa má uskutočniť medzinárodné cestovanie, ale aj to, ako sa v rámci medzinárodnej cestovateľskej arény zohľadňujú snahy, pracovné predpisy a podmienky šetrné k životnému prostrediu. Napríklad bilaterálne dohody medzi národmi umožňovali maximalizáciu letov, neskoršie dohody umožňovali prelet a zabezpečovali vzlety/odlety na medzinárodných letiskách [2].

Z environmentálneho hľadiska prvé bilaterálne dohody ešte neobsahovali žiadne ustanovenia týkajúce sa ochrany životného prostredia, avšak neskorší vývoj viedol k postupnému prijímaniu opatrení na zníženie hluku a emisií z leteckej dopravy. Napríklad už v roku 1970 sa začali vo zvýšenej miere prijímať nové nariadenia týkajúce sa znižovania hluku a kvality ovzdušia, ktoré presadzovali organizácie ICAO s cieľom znížiť škodlivé vplyvy na životné prostredie. V súčasnosti ICAO podporuje štúdie na zníženie emisií skleníkových plynov spolu so svojím lobistickým úsilím za environmentálne vhodné technológie v letectve [9].

Zo sociálneho hľadiska prvky bilaterálnych dohôd uznávali zaobchádzanie s pracovnou silou v letectve, keďže sa uznávali odpracované hodiny, normy a bezpečnosť. Medzinárodná spolupráca v letectve podporila minimálne pracovné požiadavky a bezpečnostné hľadiská pre pilotov, letecké posádky a iné letecké pracovné sily. V priebehu rokov sa to len zvýšilo

v porovnaní so zdravotnými a bezpečnostnými predpismi pre pracovníkov leteckých spoločností [3].

Okrem toho najdôležitejším záverom z bilaterálnych dohôd súvisiacich s trhom leteckého obchodu bolo otvorenie mikroekonomického trhu leteckého obchodu. Ak trh leteckej dopravy funguje na princípoch konkurencie, môže to viesť k širšej dostupnosti leteckej prepravy a nižším cenám pre cestujúcich. To však na spoločnosti vyvíja tlak na konkurenčné zisky a nižšie ceny, či ešte viac sťažuje udržanie a dodržiavanie práv zamestnancov. Došlo teda k vytvoreniu odborových zväzov na podporu práv zamestnancov špecifických pre zamestnávanie v leteckej doprave a vyjednanie výhodných miezd a podmienok. Napriek tomu na makroekonomickej úrovni – rovnosť a medzinárodná politika – boli potrebné bilaterálne dohody na podporu spravodlivého prístupu k medzinárodnej ekonomike [4].

2.1.1. Príklady najvýznamnejších bilaterálnych dohôd

Dvojstranné dohody o leteckej doprave priamo ovplyvňujú politiku a reguláciu/regionálnu liberalizáciu trhov leteckej dopravy. Najdôležitejšie z bilaterálnych zmlúv sú dohody Spojených štátov a Kanady, Spojených štátov a Európskej únie, a teda aj Európskej únie s následnými dohodami s tretími stranami, ktoré sa prelínajú na medzinárodnej úrovni. Každý z nich ovplyvňuje ekonomiku, konkurenciu a atmosféru na trhu inak. Dohoda medzi Spojenými štátmi a Kanadou z roku 1995 predstavovala jeden z prvých krokov k liberalizácii leteckej dopravy medzi dvoma historicky silnými obchodnými partnermi. Táto bilaterálna dohoda umožnila obom krajinám širší prístup na letecký trh, zvýšený počet letov a rozšírenie dostupných destinácií. Táto dohoda mala ekonomické dôsledky konkurencieschopných cien v dôsledku zvýšenej konkurencie, keďže viac obyvateľov USA a Kanady prekračuje hranice za obchodnými alebo súkromnými účelmi [10].

Táto dohoda bola v roku 2007 posilnená prijatím Dohody o otvorenom nebi, ktorá umožnila voľný prístup medzi akýmkoľvek mestom alebo destináciou v oboch krajinách. Okrem toho dohoda medzi Spojenými štátmi a Európskou úniou z roku 2007 stanovila rovnaký jasný zámer pre dohodu o otvorenom nebi. Išlo o historický medzník v úsilí o liberalizáciu, keďže týmto aktom získali letecké spoločnosti z USA a EÚ možnosť prevádzkovať trasy služieb bez recipročných obmedzení na oboch trhoch [11].

Napokon je dôležité poznamenať aj ďalšie medzinárodné bilaterálne dohody s Európskou úniou a tretími krajinami vrátane Japonska, Spojených arabských emirátov alebo Kataru. Je dôležité poznamenať, že dohoda medzi EÚ a Japonskom vznikla v roku 2021 a zabezpečuje dodržiavanie noriem pre podobnú činnosť leteckých spoločností medzi týmito dvoma regiónmi a zároveň vylučuje zbytočný regulačný zásah [12].

Ďalším významným bilaterálnym príkladom je dohoda medzi EÚ a Katarom z roku 2019. Išlo o prvú komplexnú dohodu medzi EÚ a štátom Perzského zálivu. Zahŕňa ustanovenia o hospodárskej súťaži, bezpečnosti a ochrane životného prostredia. Táto dohoda v podstate umožňuje lepší prístup k leteckým službám medzi Európou a Katarom, čo umožňuje väčší potenciál pre obchod a investície pre obe skupiny dopravcov [10].

Výhody dohôd o otvorenom nebi zahŕňajú rozšírenie leteckých trás, nižšie ceny leteniek, zlepšenie bezpečnostných a environmentálnych predpisov, efektívnejšiu hospodársku spoluprácu a stabilizáciu cien v rámci liberalizovaného trhu. Napriek tomu sú v rozpore aj s takýmito náladami – konkurencia v expanzii poškodzuje menšie národné územia a spôsobuje ďalšie znárodňovanie [11].

2.2. Bilaterálna dohoda vs. dohoda o otvorenom nebi

Dvojstranné dohody o leteckej doprave sú štandardnou formou medzinárodnej regulácie, ktorá vzniká na základe rokovania medzi vládami dvoch krajín. Tieto dohody načrtávajú veci, ako je označenie služieb, frekvencia poskytovaných služieb, kapacita na dopravcu, typy leteckých dopravcov zapojených do poskytovania služieb a procesy tvorby cestovného. Bilaterálne dohody majú zabezpečiť rovnováhu medzi vyjednávajúcimi krajinami a ich leteckými spoločnosťami, pričom často obsahujú ustanovenia na ochranu domácich dopravcov pred zahraničnou konkurenciou [11].

V dôsledku svojej ochrannárskej povahy tieto dohody stanovujú obmedzenia pre zahraničných leteckých dopravcov, ktorí chcú vstúpiť na domáce trhy danej krajiny. Dohoda o otvorenom nebi funguje v priamom protiklade k takýmto ochranným opatreniam a predstavuje odlišný štandard regulácie medzinárodnej leteckej dopravy. Napríklad tam, kde medzinárodné bilaterálne dohody stanovujú kapacity, určité frekvencie a prevádzkové príležitosti v určitých časoch a dňoch, dohoda o otvorenom nebi sa pokúša pri každej možnej príležitosti oslobodiť prístup k takýmto trhom a príležitostiam [10].

Vládnym zámerom takýchto dohôd je vyhnúť sa medzinárodnému vládnemu zasahovaniu do prevádzkových procesov leteckých spoločností týkajúcich sa cien, kapacitných úvah, určovania trás a frekvencie prevádzky. Preto sa snažia poskytnúť leteckým spoločnostiam čo najväčší rozsah integračnej flexibility až po integráciu trás a destinácií vrátane. Kde sa tieto dve dohody líšia, je úroveň regulačného obmedzenia [10].

Kľúčovým rozdielom medzi týmito dvoma modelmi je ich vplyv na medzinárodnú konkurenciu a možnosti vytvárania strategických aliancií. Zatiaľ čo bilaterálne dohody chránia domácich dopravcov pred zahraničnou konkurenciou, dohody o otvorenom nebi umožňujú medzinárodným leteckým spoločnostiam vstupovať do aliancií a vytvárať spoločné podniky. Tieto spoločné podniky zvyšujú efektívnosť využívania kapacít letísk a zároveň pomáhajú znižovať prevádzkové náklady. Z ekonomického hľadiska majú dohody o otvorenom nebi výraznejší prínos, pretože zlepšujú trh s leteckou dopravou, podporujú medzinárodný obchod a rozširujú príležitosti pre podniky, ktoré chcú vstúpiť na globálne trhy [10].

Cieľom dohody o otvorenom nebi je zrušiť vládne zásahy do leteckých práv a cieľ leteckých spoločností. Leteckým spoločnostiam je v rámci tejto dohody udelená sloboda nadviazať nové lety medzi dvoma krajinami bez potreby súhlasu ktorejkoľvek z vlád. Dohody sú navrhnuté tak, aby zlepšili cestovanie a obchodné aktivity odstránením regulačných prekážok, čím sa podporuje konkurencieschopnejší trh, ktorý slúži záujmom spotrebiteľov a podporuje rýchly rast [13] [14].

Rozdiel medzi bilaterálnou dohodou a dohodou o otvorenom nebi je regulovaná dohoda. Čím viac si štát môže udržať kontrolu nad prevádzkou leteckej spoločnosti, tým je pravdepodobnejšie, že ide o bilaterálnu dohodu. Otvorené alebo liberalizuje prístup na trh a podporuje hospodársku súťaž. Dohoda o otvorenom nebi vytvára dynamickejší a konkurencieschopnejší trh, no zároveň môže ohroziť dlhodobu chránenú výhodu domácich leteckých spoločností. Nie všetky krajiny sú ochotné podpísať dohodu o otvorenom nebi, pretože si chcú zachovať kontrolu nad svojim leteckým priemyslom a regulovať prístup zahraničných dopravcov na svoj trh. Preto sa niektoré krajiny obmedzujú na bilaterálne dohody, ktoré umožňujú väčšiu kontrolu nad tým, kto má prístup k ich vzdušnému priestoru a prevádzke. Hoci je liberalizácia medzinárodných leteckých trhov atraktívna a poskytuje rovnosť pre cenotvorbu cestujúcich a rozmanitosť medzinárodných leteckých spoločností, niektoré krajiny by radšej mali obmedzenú prevádzku, ktorú umožňujú bilaterálne dohody, a zároveň poskytujú väčšiu suverenitu nad ich leteckou/medzinárodnou prevádzkou.

2.3. Dohody s Ukrajinou, Arménskom, Tuniskom a Katarom

Rada Európskej únie schválila 28. júna podpísanie troch leteckých dohôd s krajinami – Ukrajinou, Arménskom a Tuniskom a dohodu o leteckej doprave s Katarom. Tieto dohody otvárajú cestu leteckému trhu a poskytujú nové možnosti ako pre spotrebiteľov tak aj pre dopravcov [15].

Dohody so susednými krajinami EÚ – Ukrajinou, Arménskom a Tuniskom odstraňujú obmedzenia trhu s týmito krajinami a privádzajú ich do vnútorného trhu leteckej dopravy EÚ. Tieto obmedzenia sa odstraňujú na základe toho, že tieto susedné krajiny prijali normy EÚ v oblasti letectva a implementujú pravidlá EÚ v oblasti leteckej dopravy. Dohody so susednými krajinami – Ukrajinou a Arménskom sú podpísané v rámci Spoločného leteckého priestoru, ktorý zahŕňa aj Moldavsko a Gruzínsko, zatiaľ čo dohoda s Tuniskom sa riadi rámcom dohody o leteckej doprave Euro-stredozemského charakteru, podobné dohodám s Marokom, Jordánskom a Izraelom [23].

Všetky štyri dohody obsahujú dôležité ustanovenia týkajúce sa environmentálnej, sociálnej a spravodlivej hospodárskej súťaže, s pevnými mechanizmami presadzovania, aby sa predišlo akémukoľvek narušeniu hospodárskej súťaže alebo inému zneužívaniu [23].

3. Analýza medzinárodných dohôd o leteckej doprave s Ukrajinou, Arménskom, Tuniskom a Katarom.

3.1. Dohoda o leteckej doprave medzi EÚ a jej členskými štátmi na jednej strane a Katarským štátom na strane druhej

Komplexná dohoda o leteckej doprave bola podpísaná 18. októbra 2021 a od tohto dátumu sa provizórne uplatňuje. Aby dohoda nadobudla platnosť, musí byť ratifikovaná všetkými štátmi, ako Katarom, tak aj členskými štátmi EÚ [16].

Dohoda o leteckej doprave medzi EÚ a Katarom z roku 2021 predstavuje jednu z najvýznamnejších medzinárodných zmlúv v súvislosti s leteckou dopravou medzi Európou a Blízkym

východom. Katar je dlhodobou ústrednou postavou globálnej civilnej leteckej dopravy a jednou z popredných medzinárodných leteckých spoločností (Qatar Airways) so sídlom v Dauhe. Katar mal preto vždy silné vzťahy s EÚ, pokiaľ ide o možnosti leteckej dopravy. Dohoda o leteckej doprave medzi EÚ a Katarom z roku 2021 predstavuje významný krok smerom k harmonizácii regulačných noriem, liberalizácii trhu a posilneniu bezpečnostných a environmentálnych štandardov v medzinárodnej leteckej doprave [16].

Najkritickejší prvkom spojeným s dohodou je liberalizácia trhu. Po uzavretí dohody majú dopravcovia z EÚ liberálny prístup na katarský trh a naopak. V predchádzajúcich dohodách sa posudzovalo, koľko letov bolo možné uskutočniť, koľko konkrétnych trás bolo vyčlenených na dohodu a koľko cestujúcich na každom lete. Letecké spoločnosti z EÚ a Kataru získali vďaka tejto dohode neobmedzený prístup na vzájomné trhy bez administratívnych obmedzení, ktoré existovali v minulosti [27].

Jedným z najvýznamnejších prvkov dohody je spojenie so životným prostredím a očakávaniami znižovania emisií. Z tejto dohody vyplývajú výkonnostné kritériá, podľa ktorých sú obe strany zodpovedné za prísne environmentálne záujmy a perspektívny technologický pokrok v oblasti trvalo udržateľných možností cestovania. To sa vzťahuje okrem iného na alternatívne palivá, efektívnejšie letové trasy a znižovanie hluku pre komunity v okolí letísk. EÚ sa už dlho snaží minimalizovať emisie z leteckej dopravy a táto dohoda je v súlade s jej environmentálne vhodným prístupom ku globálnemu úsiliu o udržateľné letectvo [27].

Dohoda bola finalizovaná až po ukončení embarga Kataru v roku 2021, keď sa stabilizovali geopolitické vzťahy v regióne. V rokoch 2017 až 2021 bolo uvalené na Katar embargo na leteckú dopravu so susednými štátmi Saudskej Arábie, Spojených arabských emirátov, Bahrajnu a Egypta; to znamená, že letecká doprava sa zmenila na to, že letecké spoločnosti v Katari sa museli vyhnúť všetkým vzdušným priestorom spojeným s týmito krajinami, čím sa vytvorili dlhšie modely letov a vyššie prevádzkové náklady [27].

Okrem toho je táto dohoda pre obidve strany aj finančným stimulom. Katar je druhým najväčším obchodným partnerom EÚ v oblasti energetiky, financií a stavebníctva; zvýšený prístup k leteckej doprave medzi oboma národmi môže viac podporiť len vďaka interakcii leteckej dopravy. Dohoda posilňuje pozíciu Kataru ako dôležitého leteckého uzla v globálnej leteckej doprave. Okrem toho je to v súlade s budúcim cieľom EÚ vytvoriť spoločný vzdušný priestor s ostatnými tretími krajinami [27].

3.2. Dohoda o spoločnom leteckom priestore medzi EÚ a jej členskými štátmi na jednej strane a Arménskou republikou na strane druhej

Táto dohoda o spoločnom leteckom priestore je založená na spoločných prísnych normách v oblasti bezpečnosti letectva, bezpečnostných opatrení a riadenia letovej prevádzky. Vytvára tiež nové príležitosti pre spotrebiteľov, letecké spoločnosti a letiská v Arménsku a EÚ [18].

Dohoda o spoločnom vzdušnom priestore z roku 2021 medzi Európskou úniou a Arménskou republikou je nevyhnutným

krokom v raste partnerstva EÚ s jej partnerom na východnej hranici. Cieľom dohody je nielen vytvoriť spravodlivé a nediskriminačné príležitosti prístupu na trh a prevádzka pre leteckých dopravcov, ale aj väčšiu hospodársku integráciu, zlepšenie bezpečnosti noriem a harmonizáciu právnych predpisov v oblasti letectva. V rámci Východného partnerstva EÚ je Arménsko považované za strategického partnera s potenciálom v oblasti letectva. Cieľom dohody je umožniť jeho integráciu do európskeho trhu [19].

Proces integrácie Arménska do spoločného európskeho leteckého priestoru zahŕňa postupnú implementáciu nariadení a noriem EÚ v rôznych aspektoch leteckej dopravy. To zahŕňa bezpečnostné opatrenia, bezpečnostné protokoly, riadenie letovej prevádzky, environmentálne politiky, ekonomické predpisy a ochranu spotrebiteľa. Integrácia sa uskutočňuje v dvoch prechodných fázach, ktoré umožňujú hladkú a účinnú asimiláciu Arménska do európskeho rámca letectva [18].

Veľmi dôležitý aspekt tejto dohody sa týka práv cestujúcich. Dohoda odkazuje na platné smernice EÚ v oblasti práv cestujúcich a nariadenie (ES) č. 261/2004, ktoré sa týka kompenzácie a pomoci cestujúcim v prípade odmietnutia nástupu do lietadla a zrušenia alebo veľkého meškania letov. Arménsko sa zaväzuje k tejto dohode, ktorá poskytuje vysokú úroveň ochrany cestujúcich všetkým letom medzi EÚ a Arménskom. V súlade s dohodou sú aj otázky životného prostredia. Zmluvné strany súhlasia s tým, že budú dodržiavať medzinárodné požiadavky ICAO týkajúce sa životného prostredia. [19].

Táto dohoda stanovuje, že Arménsko sa zaväzuje, zosúladiť svoje vnútroštátne predpisy s *acquis communautaire* v oblasti civilného letectva, čo zahŕňa bezpečnostné požiadavky podľa nariadenia (ES) č. 216/2008 a ďalších súvisiacich právnych aktov EÚ. Vytvorenie spoločného leteckého priestoru je zároveň podmienené začlenením EÚ noriem v oblasti certifikácie lietadiel, leteckej prevádzky a školenia posádok. Tým sa zabezpečuje, že všetci leteckí dopravcovia, či už z EÚ alebo Arménska, budú spĺňať rovnaké požiadavky, čím sa predchádza akémukoľvek zníženiu bezpečnostných štandardov [19].

Neoddeliteľnou súčasťou zvýšenia bezpečnosti je aj súlad s ekologickými normami a vplyvmi na životné prostredie. Článok 17 dohody kladie dôraz na environmentálnu reguláciu v súlade s ICAO, vrátane systému CORSIA zameraného na kompenzáciu a znižovanie emisií uhlíka v medzinárodnom letectve. Tento aspekt je priamo previazaný s bezpečnostnými otázkami, pretože moderné regulačné rámce čoraz viac vnímajú klimatické hrozby ako súčasť širšieho bezpečnostného diskurzu. Zmluvné strany sa taktiež zaväzujú dodržiavať vysoké štandardy ochrany práv cestujúcich, ktoré majú priamy dopad na ich pocit bezpečia. Súčasťou dohody je uplatňovanie nariadenia (ES) č. 261/2004, ktoré upravuje kompenzácie a pomoc cestujúcim v prípade meškaní, zrušených letov alebo odmietnutia nástupu na palubu. Z pohľadu EÚ je takáto legislatíva nielen prejavom sociálnej regulácie, ale aj nástrojom na posilnenie dôvery v bezpečnosť leteckého systému ako celku [19].

3.3. Euro-stredomorská dohoda o leteckej depreve medzi EÚ a jej členskými štátmi na jednej strane a Tuniskou republikou na strane druhej

Dohoda o spoločnom leteckom priestore medzi EÚ a Tuniskom, podpísaná v roku 2021, je súčasťou snahy EÚ o prehĺbenie vzťahov s krajinami južného Stredomoria, najmä v oblasti dopravného prepojenia a hospodárskej integrácie [20].

Jedným z kľúčových základných cieľov tejto dohody je uľahčiť leteckú dopravu medzi EÚ a severnou Afrikou, čo znamená, že sa vytvára jednotný letecký priestor, ktorý sa riadi rovnakými pravidlami a inštitucionálnym rámcom pre všetky zmluvné strany. Takáto konektivita nie je len otázkou dopravy – je to otázka zvýšenej regionálnej stability a ekonomickej stimulácie a podpory cestovného ruchu, ktorý je sektorom hospodárskeho rozvoja so strategickými zámermi pre Tunisko [20].

Dohoda podporuje dlhodobú multikultúrnu a hospodársku integráciu EÚ s krajinami Maghrebu. Sieť leteckej dopravy robí regióny stabilnejšími, keďže sa spájajú s inými oblasťami a to ľuď, tovaru, investícií a informácií. Vzhľadom na to, že migrácia zo severnej Afriky do Európy a z Európy do severnej Afriky je aktuálna téma, bezpečná legálna a efektívna sieť leteckej dopravy vytvára príležitosti na legálny prístup, čím sa znižuje napätie okolo nelegálneho vstupu a emigrácie. Dohoda okrem toho upevňuje postavenie EÚ ako dopravného partnera pre Tunisko, keďže EÚ sa profiluje ako hlavný partner Tuniska v oblasti rozvoja dopravnej infraštruktúry vrátane letectva [20].

Tuniská dopravná sieť je dobre prepojená prostredníctvom bilaterálnych dohôd s európskymi, africkými a arabskými krajinami, pričom sa zameriava najmä na strednú a západnú Európu a nie na východnú a severnú Európu [21].

Dohoda medzi EÚ a Tuniskom má veľký hospodársky význam pre oboch partnerov. Čím viac letov s väčším prístupom ponúka, tým príležitosti na obchodovanie a investovanie, ako aj na posilnenie hospodárskych väzieb spôsobených leteckou dopravou. Tunisko je zároveň žiadanou turistickou lokalitou pre tých, ktorí chcú cestovať do a z Európy. Podobné dohody uzavrela EÚ aj s Ukrajinou, Arménskom a Katarom, pričom všetky sledujú rovnaké ciele a majú podobné implementačné mechanizmy [20].

3.4. Dohoda o spoločnom leteckom priestore medzi EÚ a jej členskými štátmi na jednej strane a Ukrajinou na strane druhej

Práca na dohode sa začala ešte v roku 2006. Rokovania ohľadne dohody boli ukončené v roku 2013, ale podpis dohody bol odložený pre nehodu medzi Španielskom a Spojeným kráľovstvom týkajúce sa letiska v Gibraltári. Novo podpísaná dohoda stanovuje jednotné pravidlá pre služby leteckej dopravy medzi EÚ a Ukrajinou. Cieľom dohody bolo riešiť rastúci dopyt po cenovo dostupnej a kvalitnej leteckej doprave medzi Ukrajinou a EÚ, ktorá je poháňaná ekonomickými, obchodnými a kultúrnymi väzbami, ako aj bezvízovým režimom [22].

Dohoda o spoločnom leteckom priestore medzi EÚ a Ukrajinou, podpísaná v októbri 2021, predstavuje významný regulačný aj geopolitický dokument, ktorého strategická hodnota sa naplno prejavila počas vojenskej agresie zo strany Ruska. V predvojnovom období predstavovala dohoda najmä technický

krok smerujúci k ďalšej integrácii Ukrajiny do európskeho leteckého priestoru. Po skončení konfliktu bude dohoda slúžiť ako základ pre prehĺbenie partnerstva s EÚ a pre povojnovú obnovu krajiny [24].

Jednou z výrazných črt dohody je jej rešpektovanie právnych predpisov Európskej únie v oblasti civilného letectva. Uplatňovanie pravidiel v oblasti leteckej bezpečnosti, certifikácie lietadiel a licencií posádok je úzko späté so zachovaním funkčnej infraštruktúry a spolupracou s medzinárodnými partnermi. Súlad s **Agentúrou Európskej únie pre bezpečnosť civilného letectva** (EASA) preto znamená, že v prípade, že Ukrajina buď pozastaví akékoľvek civilné využitie letectva alebo ak by došlo k prerušeniu civilnej leteckej prevádzky z bezpečnostných dôvodov, jej zariadenia si stále zachovávajú technickú spôsobilosť [24].

Význam dohody je v tom, že počas vojny nebola pozastavená. Ide teda o stály symbol platnosti medzi Ukrajinou a EÚ. Ak má zostať platný a účinný na oboch stranách, je to prejav záväzku – Ukrajina stále potvrdzuje svoju cestu reforiem a EÚ stále vyjadruje dôveru v obnovu Ukrajiny a jej budúcu integráciu [24].

4. Doložky o environmentálnej, sociálnej a spravodlivej hospodárskej súťaži v kontexte súčasnej legislatívy a pravidiel

4.1. Environmentálne aspekty leteckej dopravy v súčasných dohodách

Životné prostredie je často zahrnuté v týchto dohodách s cieľom zmierniť negatívne environmentálne dopady leteckej dopravy. Je nevyhnutné začleniť opatrenia na ochranu životného prostredia do dohôd o letectve vzhľadom na podstatný vplyv leteckého priemyslu na emisie skleníkových plynov a iné environmentálne faktory.

Vo všetkých štyroch analyzovaných dohodách sa environmentálne opatrenia viažu na záväzok rešpektovať a implementovať normy Medzinárodnej organizácie civilného letectva, najmä v súvislosti s kontrolou emisií skleníkových plynov, hlukovej záťaže a energetickej efektívnosti. Ukrajina, Arménsko aj Tunisko sa podľa príslušných článkov svojich dohôd zaviazali dodržiavať požiadavky ICAO a aktívne prispievať k systému CORSIA, ktorého cieľom je dosiahnuť klimatickú neutralitu rastu emisií v medzinárodnom letectve [24].

V rámci znižovania ekologickej stopy sú v dohodách aj v strategických dokumentoch štátov definované viaceré možné opatrenia. Prvým je modernizácia flotíl dopravcov, najmä zavádzaním lietadiel novej generácie, ktoré sú schopné zabezpečiť vyššiu palivovú efektívnosť a nižšie emisie CO₂ [25]

Ďalším riešením je prechod na alternatívne a obnoviteľné palivá. Významnú úlohu zohráva používanie tzv. SAF – sustainable aviation fuels, ktoré môžu znížiť uhlíkové emisie až o 80 % v porovnaní s tradičným kerozínom [25].

Treba zároveň poznamenať, že environmentálne doložky sa líšia v rozsahu záväznosti. Kým dohoda s Ukrajinou zavádza priamy záväzok postupne prijímať právne predpisy EÚ vrátane tých environmentálnych, dohoda s Katarom ponecháva väčšiu flexibilitu pri ich interpretácii a aplikácii. To odráža rozdiely

v úrovni pripravenosti a ekonomického vývoja partnerských krajín, no zároveň podčiarkuje dôležitosť jednotného rámca pre zabezpečenie rovnocenných environmentálnych štandardov [25].

Environmentálne doložky sa stali integrálnou súčasťou novodobých leteckých dohôd a ich význam v nadchádzajúcich rokoch ešte porastie. Nielen ako reakcia na klimatické výzvy, ale aj ako faktor určujúci konkurencieschopnosť, dôveryhodnosť a kvalitný rast celého sektora medzinárodnej dopravy.

4.2. Sociálne aspekty v letectve a ochrana práv zamestnancov

Doložky o sociálnych hľadiskách sa zvyčajne zameriavajú na ochranu práv pracovníkov, zlepšenie pracovných podmienok a podporu sociálnej spravodlivosti. Medzi sociálne hľadiská môžeme zaradiť práva pracovníkov, odbornú prípravu, nediskrimináciu, sociálne výhody a migráciu pracovníkov. Špecifiká týchto sociálnych ustanovení sa môžu líšiť v závislosti od priorít a politik každej krajiny. Celkovo sa snažia tieto sociálne aspekty o dodržiavanie spravodlivých a bezpečných pracovných podmienok, ochranu práv zamestnancov a presadzovanie rovnosti a sociálnej zodpovednosti v medzinárodnej leteckej doprave [25].

Dohody obsahujú monitorovacie a konzultačné prvky – spoločné výbory, prostredníctvom ktorých možno upozorniť na oznámené porušenia pracovných práv a viaceré strany môžu diskutovať o úsilí o riešenie [25].

Poskytovanie technickej pomoci a odborného *know-how* zo strany EÚ je často podmienené dodržiavaním sociálnych štandardov. Zhrnutie sociálnych aspektov do leteckých dohôd nie je formálnym gestom, ale súčasťou širšieho úsilia o vytvorenie transparentného a spravodlivého trhu, ktorý rešpektuje základné ľudské práva. Keďže svet rýchlo napreduje smerom ku globalizácii, konkurenčné tlaky podporujú flexibilitu a šetrnosť pred úspechom. Zabezpečenie dôslednej ochrany sociálnych práv by malo byť základným predpokladom každého medzinárodného dohovoru v oblasti letectva [25].

4.3. Spravodlivá hospodárska súťaž

Konkurenčný trh je miesto, kde nezávislé podniky súťažia o prilákanie spotrebiteľov tým, že ponúkajú nižšie ceny, lepšiu kvalitu a širší výber, čím sa zabezpečuje spravodlivá hospodárska súťaž. Účinná hospodárska súťaž pre podniky zabezpečuje rovnaké podmienky a pre spotrebiteľov prináša niekoľko výhod ako sú napr. nižšie ceny, lepšia kvalita či širší výber [26].

Všetky analyzované dohody – vrátane tých s Ukrajinou, Arménskom, Tuniskom a Katarom – obsahujú doložky zamerané na ochranu hospodárskej súťaže a zabránenie narušenia trhového prostredia. V praxi sa tieto ustanovenia premietajú do záväzku strán rešpektovať pravidlá, ktoré zamedzujú poskytovaniu neprimeranej štátnej pomoci subjektom pôsobiacim na trhu leteckej dopravy [26].

Dôležitou súčasťou spravodlivej hospodárskej súťaže je aj prevencia monopolizácie trhu. Dohody obsahujú doložky, ktoré sa zameriavajú na podporu plurality dopravcov, zabraňovanie

zneužívania dominantného postavenia a boj proti nekalým obchodným praktikám [27].

5. Vyhodnotenie prínosu analyzovaných medzinárodných dohôd pre trh leteckej dopravy

Medzinárodné dohody EÚ o leteckej doprave, najmä dohody o spoločnom leteckom priestore, sú kľúčové pre udržanie jednotného a otvoreného európskeho leteckého trhu. Na základe dohodnutých pravidiel liberalizácie poskytujú CAA prístup na trh bez kapacitných a tarifných obmedzení a rovnaké podmienky medzi dopravcami, ktoré majú priamy vplyv na dostupnosť dopravy, kvalitu služieb a geopolitický vývoj regiónov. Dohody s Ukrajinou, Arménskom, Tuniskom a Katarom viedli k postupnému odstraňovaniu tradičných obmedzení v leteckej doprave, ako sú limity na počet dopravcov, frekvenciu letov alebo dostupnosť konkrétnych destinácií. Umožnením neobmedzeného počtu letov medzi zmluvnými stranami sa zvyšuje flexibilita plánovania trás, zlepšuje spojenia do menších miest, ktoré sa inak nenachádzajú v hlavných dopravných uzloch [28].

Dôležitým prínosom týchto dohôd je rozvoj regiónov s periférnymi letiskami, ktoré boli doteraz využívané len obmedzene. Prístup na trh zahraničných dopravcov poskytuje na týchto regionálnych letiskách nové príležitosti na využitie kapacity.

6. Návrh možného rozšírenia zmluvnej spolupráce medzi EÚ a ďalšími tretími krajinami v kontexte vyhodnotenia prínosu pre SR

Rozširovanie vonkajšej leteckej politiky EÚ prostredníctvom dohôd s tretími krajinami je dlhodobou overenou nástroj podpory medzinárodného obchodu, diplomatických vzťahov a dostupnosti leteckej dopravy pre občanov na oboch stranách.

Potenciálni partneri by však mali zahŕňať tieto kritériá: veľkosť trhu, veľkosť ekonomiky, stupeň hospodárskeho rozvoja, veľkosť potrebnej infraštruktúry, blízkosť k Únii, stabilita riadenia a rozsah zámerov riadenia krajiny a jej snaha viac sa angažovať v Európe.

Jednou z oblastí, ktorá slúži ako priesečník v mnohých oblastiach, je Blízky a Stredný východ. Blízky a Stredný východ pôsobí ako významná križovatka medzi Európou a Áziou. Pokiaľ ide o samotnú krajinu, Saudská Arábia zohráva veľkú úlohu. Je to tiež najväčšia krajina v tejto oblasti. Saudská Arábia má významný potenciál v oblasti medzinárodného obchodu, ktorý posilňuje ambiciózný reformný program Vision 2030 [29].

Ďalším sľubným potenciálnym trhom je Oceánia, najmä Austrália a Nový Zéland. Tieto krajiny zdieľajú históriu partnerstiev s EÚ v oblasti vzdelávania, cestovného ruchu a obchodu. Geografická vzdialenosť má za následok relatívne málo priamych spojení s EÚ – väčšina ciest si vyžaduje medzipristátie v Ázii – napriek tomu by spoločná dohoda o leteckej doprave zvýšila počet priamych spojení a podporila spoluprácu medzi dopravcami pôsobiacimi na oboch trhoch [30].

Celkovo existuje značný potenciál pre budúce dohody s tretími krajinami, ktoré by mohli rozšíriť sieť leteckých spojení medzi EÚ

a svetom. Partnerstvo má zmysel pre udržateľný rast, pretože takíto spoľahliví partneri majú potenciál pre internacionalizovaný rast a zároveň sa podľa potreby prispôbujú medzinárodným cieľom a štandardom. Zároveň prispieva k posilňovaniu strategickej autonómie EÚ prostredníctvom diverzifikácie dopravných možností a udržateľnejšej mobility, čím podporuje ciele v oblasti zmeny klímy.

6.1. Prínos pre slovenský letecký sektor

Rozšírenie spolupráce EÚ s tretími krajinami v oblasti civilného letectva prináša výhody pre celú Úniu vrátane Slovenskej republiky. Vzhľadom na to, že Slovensko nemá vlastného národného dopravcu a že jeho trh civilného letectva je ešte menší ako priemer EÚ, je akákoľvek účasť na multilaterálnych dohodách EÚ s inými krajinami mimo Európy nevyhnutná. Takéto dohody ovplyvňujú kvalitu dopravných trás, zvyšujú regionálnu dostupnosť a obchodné aktivity a uľahčujú priame zahraničné investície na Slovensku [31].

Letecké spojenie je jedným z hlavných predpokladov rozvoja medzinárodného cestovného ruchu. Pre Slovensko je cestovný ruch významným odvetvím hospodárstva: podľa Štatistického úradu Slovenskej republiky predstavuje cestovný ruch viac ako 6 % HDP, zatiaľ čo v konkrétnych regiónoch – Vysoké Tatry, Liptov, Orava alebo Bratislava – má cestovný ruch ešte väčší ekonomický vplyv. Na prilákanie turistov z mimoeurópskych krajín je preto potrebná kvalitná letecká infraštruktúra a priame letecké spojenie s krajinami pôvodu.

Napríklad priama letecká nákladná doprava do Latinskej Ameriky alebo Ázie by poskytla lepšie exportné príležitosti pre slovenské spoločnosti v oblastiach high-tech, spoločnosti vo farmaceutickom priemysle a tradičnejšie priemyselné prostredie. V leteckej doprave zohráva čas doručenia zásadnú úlohu, najmä pri tovare vysokej hodnoty alebo krátkej životnosti [29].

Geografická poloha Slovenska v srdci Európy je výhodná, nachádza sa na križovatke dopravných koridorov. Ak sa historicky využívala železničná a cestná doprava, s rozvojom leteckých spojení by sa mohol využiť aj letecký a logistický potenciál. Pre zahraničných investorov hľadajúcich nové lokality pre logistické parky, nákladné terminály, opravovne lietadiel alebo centrá výskumu a vývoja by členstvo v Spoločnom leteckom priestore mohlo ponúknuť potenciálne atraktívne podmienky [31].

Zahraniční investori navyše často hľadajú stabilitu, predvídateľnosť právnych predpisov a kvalitu infraštruktúry. Slovensko sa môže hodiť do všetkých troch kritérií vďaka členstvu v EÚ a spoločnému zázemiu v oblasti leteckej politiky, ktoré ponúka stabilné obchodné vyhliadky a prístup na širšie trhy. Toto je obzvlášť žiadané v súčasnosti, keď stále viac spoločností hľadá alternatívy k Ázii a chce umiestniť logistické operácie bližšie k európskemu trhu [31].

Záver

Problematika medzinárodných dohôd o leteckej doprave medzi Európskou úniou a tretími krajinami predstavuje významný nástroj pre rozvoj globálnej leteckej siete, liberalizáciu trhu a

podporu konkurencieschopnosti dopravcov. Súčasne sa tieto dohody stávajú platformou pre presadzovanie kľúčových hodnôt EÚ v oblasti ochrany životného prostredia, sociálnych práv a spravodlivej hospodárskej súťaže.

Analýza ukázala, že medzinárodné dohody EÚ s Ukrajinou, Arménskom, Tuniskom a Katarom zohrávajú kľúčovú úlohu pri otváraí trhu leteckej dopravy a súčasne chránia environmentálne a sociálne štandardy. Dohoda s Ukrajinou výrazne podporuje harmonizáciu pravidiel s legislatívou EÚ, Arménsko sa zaviazalo dodržiavať predpisy v oblasti bezpečnosti a životného prostredia, Tunis priniesol pozitívne zmeny v prístupe k spravodlivej súťaži a Katar prijal záväzky v oblasti pracovného práva a environmentálnej ochrany.

Na základe vykonanej analýzy a posúdenia možností sme navrhli rozšírenie zmluvnej spolupráce EÚ v oblasti letectva s krajinami, ktoré spĺňajú strategické, ekonomické, technologické a bezpečnostné kritériá. Vybrali sme regióny a štáty ako Saudská Arábia, Austrália, Nový Zéland a Brazília, ktoré predstavujú významný potenciál pre rast obchodných vzťahov, zlepšenie mobility obyvateľstva a podporu udržateľného rozvoja. Naš návrh vychádza z aktuálnych globálnych trendov diverzifikácie trhov, posilňovania strategickej autonómie a budovania silnejšej globálnej pozície EÚ.

Referencie

- [1] PRUŠA, J. a kol. 2015. Svět letecké dopravy. II. rozšírené vydání. Praha : Galileo Training s. r. o., 2015. ISBN 978-80-260-8309-2
- [2] THE INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. 1944. Convention on International Civil Aviation. Dostupné na internete: <https://www.icao.int/publications/Documents/7300_1ed.pdf>
- [3] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. 2021. Air Transport Economic Report. Dostupné na internete.
- [4] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. 2017. Aviation Environmental Protection Report. Dostupné na internete
- [5] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. 2010. Regulatory Framework for Air Transport Services. Dostupné online
- [6] EUROPEAN PARLIAMENT. 2016. International aviation agreements. Dostupné na internete: <[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2016/593524/EPRS_ATA\(2016\)593524_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2016/593524/EPRS_ATA(2016)593524_EN.pdf)>
- [7] U.S. DEPARTMENT OF STATE. 2009. Open Skies agreements. Dostupné na internete: <<https://2009-2017.state.gov/e/eb/tra/ata/index.htm>>
- [8] EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY. 2025. International cooperation explained. Dostupné na internete: <<https://www.easa.europa.eu/en/domains/international-cooperation/international-cooperation-explained>>

- [9] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. 2006. *International Standards and Recommended Practices (SARPs)*. Dostupné na internete
- [10] U.S. DEPARTMENT OF STATE. 2025. *Open Skies Partnerships: Expanding the Benefits of Freer Commercial Aviation*. Dostupné na internete: < <https://2009-2017.state.gov/e/eb/tra/ata/index.htm>>
- [11] EUR-LEX. ACCESS TO EUROPEAN UNION LAW. 2025. *Prehľad obchodných dohôd medzi EÚ a ďalšími krajinami*. Dostupné na internete: < <https://eur-lex.europa.eu/summary/chapter/32.html>>
- [12] AIR TRANSPORT AGREEMENT BETWEEN THE GOVERNMENT OF THE UNITED STATES OF AMERICA AND THE GOVERNMENT OF [COUNTRY]. 2012. Dostupné na internete
- [13] SIMPLE FLYING. 2023. *How do Open Skies Agreements Work?*. Dostupné na internete: < <https://simpleflying.com/how-do-open-skies-agreements-work/>>
- [14] FCM TRAVEL. 2025. *Explained: Open Skies and Business Travel*. Dostupné na internete: < <https://www.fcctravel.com/en-us/resources/insights/explained-open-skies-and-business-travel>>
- [15] RADA EURÓPSKEJ ÚNIE. 2021. *Medzinárodná letecká doprava: Rada schválila podpísanie významných dohôd so štyrmi krajinami*. Dostupné na internete: <<https://www.consilium.europa.eu/sk/press/press-releases/2021/06/28/international-aviation-council-greenlights-signing-of-major-agreements-with-four-countries/>>
- [16] EUROPEAN COMMISSION. 2021. *Questions and Answers: EU and Qatar sign a Comprehensive Air Transport Agreement*. Dostupné na internete: < https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_5345 >
- [17] Dohoda o leteckej doprave medzi Európskou úniou a jej členskými štátmi a Katarom. 2021.
- [18] EU MONITOR. 2021. *Questions and answers: EU and Armenia sign a Common Aviation Area Agreement*. Dostupné na internete: <https://www.eumonitor.nl/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vlnxkgepmto?ctx=vgaxlcr0dzzv&start_008_0b4=5>
- [19] Dohoda o spoločnom vzdušnom priestore medzi Európskou úniou a jej členskými štátmi a Arménskou republikou. 2021.
- [20] Euro-stredomorská dohoda o letectve medzi Európskou úniou a jej členskými štátmi a Tuniskou republikou. 2021.
- [21] SCHLUMBERGER, CH. E. – WEISSKOPF, N. 2012. *Open Skies in North Africa: Is Tunisia the Next Morocco?*. Dostupné na internete: <<https://www.iemed.org/wp-content/uploads/2021/02/Open-Skies-in-North-Africa-Is-Tunisia-the-Next-Morocco.pdf>>
- [22] MISSION OF UKRAINE TO THE EUROPEAN UNION. 2021. *EU and Ukraine sign milestone aviation agreement*. Dostupné na internete: < <https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/en/news/ukrayina-ta-yes-pidpisali-ugodu-pro-spilnij-aviacijnij-prostir> >
- [23] Dohoda o spoločnom leteckom priestore medzi Európskou úniou a jej členskými štátmi a Ukrajinou. 2021. Brusel: Európska únia.
- [24] KNOW HOW. 2023. *What is Green Aviation and Is It Possible?*. Dostupné na internete: <<https://knowhow.distrelec.com/defence-aerospace-and-marine/what-is-green-aviation-and-is-it-possible/>>
- [25] EUROPEAN COMMISSION. 2025. *Mobility and Transport. Air*. Dostupné na internete: <https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air_en?prefLang=sk>
- [26] EUR-LEX. ACCESS TO EUROPEAN UNION LAW. 2025. *Hospodárska súťaž*. Dostupné na internete: <[eurl-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/?uri=LEGISSUM:competition](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/?uri=LEGISSUM:competition)>
- [27] Abate, M. & Christidis, P. 2020. *Deregulation of international air transport: Stakeholders, institutions and markets in a European common aviation area*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 136, pp. 1–14. ISSN 0965-8564. Dostupné online: <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.03.017>>
- [28] DELOITTE. 2022. *Green Aviation – Reducing Emissions Along the aircraft value chain*. Dostupné na internete: < <https://www2.deloitte.com/fr/fr/pages/energie-et-ressources/articles/green-aviation.html>>
- [29] XU, J. 2022. *EU's External Open Skies Policy: EU–China and EU–Japan Relations*. University of East Anglia. Dostupné na internete: < <https://www.uvic.ca/humanities/intd/europe/assets/docs/2015%20state%20of%20the%20eu/Xu.pdf>>
- [30] EUROPEAN COMMISSION. 2010. The EU's external aviation policy – Addressing future challenges. COM(2010) 210 final.
- [31] EUROPEAN COMMISSION. 2011. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. COM(2011) 415 final.



MODERN TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE USAGE IN THE AIRLINE'S OPERATIONAL CONTROL CENTRE

Tomáš Chalás
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Michal Pazourek
ABS Jets, a.s.
K Letišti 549 – Hangár C
Praha 6 - Ruzyně
160 00 Praha

Abstract

This article briefly describes the way of work of flight operations dispatchers with the development of the new technology and shows new available solutions on the market. This research includes the development of the responsibilities and job description of a flight dispatcher. The article describes the way of work and abilities of artificial intelligence as a new advancement of modern technology. Gained knowledge is then applied in the SWOT analysis, based on the observation in the operations control centre in the ABS Jets airline, discussions conducted with flight dispatchers on duty and an expert from Avcon Jet AG. Options and methodology for the implementation of simple artificial intelligence tools and the scope of activities are suggested, based on the state described. For the research of possible usage, the tests were conducted on the paid version of AI Assistant Microsoft Copilot (version 1.5.3, as of 27th of March 2025). The tests were based on the OFPs, evaluated by the AI Assistant with simulated erroneously planned flights. After a series of tests, outcomes are evaluated and compared with the defined desirable outcome. Consequently, the thesis describes potential solutions for weaknesses and opportunities based on the SWOT Analysis by implementing artificial intelligence in the other activities connected with the operations of a business jet operator.

Keywords

OCC, Dispatcher, Copilot, Artificial Intelligence, Flight Planning

1. Introduction

The world and the new modern technologies are evolving at a very high pace. New software and a new solution to everyday problems just enters the market. The aviation industry is not an exception. In this research, the focus was laid to describe the way of work of the flight operations dispatcher's, their responsibility, the SWOT analysis of the state of the selected observed OCC. Based on this, the suggestions were made and a solution from the AI assistant tested.

Operations Control Centre can be easily defined as the pulsing hearth or the brain of the whole airline. Such a centre is working independently from the other parts of the airline. The operations control centres are not mentioned and defined as airline's department by EASA, ICAO or FAA. However, all the regulatory bodies defined the activities, that must be conducted and are usually done by the OCCs. Based on SKYBrary, the Operations Control Centre is the facility, that plans, monitors, coordinates and manages various aspects of an airline's day-to-day activities. The main task is to ensure, that operations run smoothly, efficiently and safely.

Each OCC is as different as the operations of each aircraft operator. It is based on the volume of traffic, size of the fleet, it covers and other factors. Whereas bigger airlines as Lufthansa, British Airways or KLM can have OCCs staffed by more than 10 dispatchers one-time, doing specifically one part of the main job description of the flight dispatcher, and running 24/7, smaller airlines, can just have one person appointed, providing all the services necessary to the airline. Even, smaller airlines and aircraft operators can outsource these services and have them provided by different providers.

1.1. Flight Dispatcher

Job description of the flight dispatcher is defined by ICAO Annex 6 as a person, who is designated by the operator to engage in control and supervises the flight operations. Such personnel must be suitably qualified, under the ICAO Annex 1 and the state's local rules and norms. In general, the flight dispatcher is responsible for these main tasks:

Flight preparation – Flight dispatcher is responsible for making all the necessary arrangements before the flight

Flight planning – Preparation of the Operational Flight Plan, checking the weather and operational information necessary to plan the flight.

Flight monitoring – Flight dispatcher checks regularly the state of the flight, its location and the evolution of the conditions en-route. In case the flight should be landed, the flight dispatcher checks this information with receiving of Movement message or through the communication with the pilot.

Operational Control – In Europe, it is not common to share the Operational Control with the pilot. In case, the company allows sharing the responsibility, both the pilot and the flight dispatcher can make operational decisions regarding the flight. Otherwise, the responsibility is laid only on the pilot in command.

1.2. Artificial Intelligence

Artificial intelligence is a technology, that allows computers or machines to replicate human behaviour in terms of learning, comprehension, solving problems, creativity and autonomy. Such a system than can identify objects, understand and

respond to human language. EASA defines Artificial Intelligence as: “Technology, that can, for a given set of human-defined objectives, generate outputs, such as content, predictions, recommendations or decisions influencing the environment, they interact with.

1.2.1. Types of artificial intelligence

AI can be divided into various approaches and subcategories:

Machine learning – One of the earliest developed types of AI, developed in 1950s. Based on creation of the models and training different algorithms to make predictions based on data, without being explicitly programmed for such a task. Machine learning models are based on neural networks, which are very similar to human brains, in the way, how nodes of the neural network communicate with each other.

Logic and knowledge-based (LKB) approaches – These approaches can be described as computer programs that use a knowledge base to solve typical problems. Their main task is to support humans in the decision-making process.

Statistical approaches – Use of different series of predetermined equations to find out how to fit the data. Such approaches include Bayesian estimation, search and optimization methods

Hybrid AI – Introduce the combination of various technologies and methods to enhance the abilities of AI in terms of performance, versatility and problem solving. Compared to other methods, such a system can offer more interpretable and scalable solutions, accurate insights and increased operational efficiency.

Generative AI – Is the newest developed and advanced of all the AI types. It can create original content such as texts, images, videos, audio or software code. Such type of artificial intelligence works in 3 phases

- **Training** – creation of the base-foundation model and training for wide variety of tasks
- **Tuning** – adjustment to the user’s usual prompts and requests
- **Generation, evaluation and more tuning** – creation of the feedback loop

As **benefits of generative AI**, it can be mentioned: content creation and answer to the user demands, enhanced creativity, dynamic personalization and constant availability

Drawbacks of using generative AI include:

- Hallucinations and inaccurate outputs
- Inconsistent outputs
- Bias
- Lack of explainability and metrics
- Threats to security, privacy and intellectual property
- Deepfakes

1.3. EU Legal framework

In 2024, the European Union was the first to issue comprehensive rules for using AI in the real world. The regulation EU 2024/1689 addresses all the risks, ensures harmonised rules and safe usage across the member states. The regulation established a risk-based approach towards the AI. Basis for the regulatory framework was firstly published in the report on Ethics Guidelines on Artificial Intelligence. The 7 key ethical requirements for trustworthy AI include:

- Human Agency and oversight
- Technical robustness and safety
- Privacy and data governance
- Transparency
- Diversity, non-discrimination and fairness
- Societal and environmental well-being
- Accountability

These guidelines are non-binding and do not create any legal obligation. However, they are still the basis for the EU AI Act and the approach of EASA towards the usage of AI.

1.3.1. Risk Categories

Risk of using AI was separated into 4 different categories, according to the level of approval of using AI in the industry. Such categories are:

Unacceptable risk areas – Use of AI, which is prohibited at all costs and considered harmful. These include, manipulation techniques, social judging of people, biometric categorization, real-time remote biometric identification, individual predictive policing, recognition of emotions and untargeted scrapping of the internet or CCTV.

High-risk cases are cases that might pose a serious risk to health, safety or other functional rights. These include AI components in the critical infrastructure or education institutions, safety components of products, tools for employment, biometrics, essential private and public services, law enforcement, immigration and border control, justice and democratic processes.

Such systems can be operated in case they perform very narrow procedural tasks, improve the result of the human decision made before, do not influence human decisions and do purely preparatory work. In case such systems are used in these cases, AI systems must then satisfy conditions based on the regulation of the EU AI Act. The deployer of the high-risk AI systems is also responsible for operating the AI according to the already published instructions, registered as the operator of the AI in the database and other important conditions.

Transparency risk cases – it is necessary to know, what AI is doing and how it is used. The EU AI Act ensures that such a risk is treated, and the human user is informed how the information is kept. The content created by AI must be clearly identified, visually labelled and text published.

Minimal or no-risk cases – Includes common cases of using the AI in the video games or spam filters.

2. Methodology and mission

Main goal and mission of the research was to identify the spots and possible ways to implement artificial intelligence in the operation of the airline. The spots were identified in decreasing the number of errors in the flight planning phase and optimising the time spent on daily tasks of the airline's OCC. The partial goals were set to:

- Describe the current situation at the OCC
- Describe in general the way of work of the flight dispatchers today
- Investigate the types of artificial intelligence and its regulatory framework valid in the EU

Sources of information used consisted of:

- Research performed on the internet regarding the history and current situation at the OCC
- The author's observations and experience during the shift at the OCC
- Study of the company's Operations Manual and Internal norms of the company
- Study of the materials published on the internet, explaining the artificial intelligence and regulatory framework adopted by the European Commission and EASA.

In the practical part of the research the partial goals were established:

- Conduct the SWOT analysis of the OCC of the company, identify the opportunities and threats, and present the results of the evaluation
- Create a plan and suggestions for the implementation of AI in the field of OCC.
- Propose steps to efficiently implement such a solution

As the sources for practical part of the research, these methods were used:

- Visits at the OCC of ABS Jets during the high-peak season
- Discussions with multiple flight-dispatchers on duty
- Synthesis of the facts using the SWOT Analysis
- Discussion of the findings of the SWOT analysis with the expert from different business jet operator – Avcon Jet AG

Based on the analysis conducted, the suggestions for solutions were made.

3. Discussion and OCC situation

Before analysing the state of the observed OCC, main assumptions about the OCC of the business jet operator were made:

- OCC is preparing and administering business and general aviation flights
- High variability of traffic in terms of destinations, number of flights per week, time of operation and fleet
- OCC is staffed with a maximum 3-4 people on the day shift (relatively small)
- Flight dispatchers on shift have different seniority and experience
- Tasks of the flight dispatchers are not separated, taking care of the whole flight, from the first request to the successful landing of the flight at the destination.

3.1.1. SWOT Analysis outcomes

SWOT analysis of the OCC was focused on the flow of the processes, work and identification of the strengths and weaknesses inside the OCC environment. Visits at the OCC of ABS Jets, as the main source of information were conducted in the high-peak season in summer, 2024. The outcomes of the SWOT Analysis were later discussed and supplemented with the views of Mr. Norbert Pavlisin, from Avcon Jet AG, to cover the reality of the flight dispatchers at the business jet operators OCC as accurately to the reality as possible.

As the strength of the OCC were identified

- Business model based on providing OCC services for 3rd party customers (with their own aircraft and crew)
- Developed shift and seniority structure
- Usage of different flight planning software
- Good database of the previously conducted flights and operational control system

As weaknesses were identified:

- High usage of paper and relying on information in the paper folders
- Technologically old locally developed operations control software
- Flight monitoring is not prioritized compared to flight planning
- Communication and high flow of information, which might lead to human errors

As opportunities for future development of the OCC were identified

- Substitution of paper sheets with tablets
- Optimization of the time of flight preparations

- Using AI in the OCC e-mail communication with other stakeholders
- Creating the system for approval of airports based on the relevant available information

As the threats for the airline's OCC currently were identified:

- High investment costs for necessary software upgrades
- Security and novelty of artificial intelligence
- People's turnover in the flight dispatcher positions

3.2. *Proposals for solutions*

According to the SWOT Analysis, the possible proposals were suggested and partly tested. Based on the analysis, it can be concluded that possible improvements are possible in optimizing the time of flight preparations and in decreasing the number of errors made by the flight dispatchers. Assumptions for the targeted OCC were made:

- OCCs which want to find a short or mid-term solution (for 3-5 years)
- Does not have a high budget to invest in the planning software
- Are seeking optimization of the processes before the beginning of the high-peak season
- Have flight-dispatchers at the beginning of their career with minimal experience (graduates from the university)
- OCCs dealing with high variability of traffic (in terms of destinations, aircraft fleet)

3.2.1. *Application of an AI assistant*

As the AI assistants are rolling out, offering help in all the everyday life domains, various chatbots can be helpful in terms of identifying the errors and speeding up the processes inside the OCC without the necessity of a big investment, high integration and access to the confidential parts of the airlines. Therefore, the AI assistant was selected to be checked.

The selected AI assistant for the test is the solution from Microsoft – Copilot 365. Main reason for the choice included:

- **Integration within the Microsoft Office environment**
- **Security**, which can be administered and adjusted to the company IT policy and restrict the AI to be share and learn from the user's prompts
- **Low investment costs**
- **Advanced AI model algorithm** – Copilot is powered by the same engine architecture as ChatGPT – GPT-4

Descriptions of the test on the Microsoft Copilot:

To examine the usability of such a tool in real life, Copilot received for analysis in total 10 operational flight plans, from that, 5 were correctly planned and 5 contained mistakes. Those mistakes consisted of:

- The destination and alternate airports are too far
- Captain of the flight was not appointed in the flight
- The fuel was negative
- Direct was used instead of the route
- Flight was scheduled inside the military zone

Tests were made on the untrained model, with deleted history and paid version of Microsoft Copilot (version 1.5.3, released on 27th of March 2025).

After **first reading of the flight plans**, Copilot was able to read and identify most of the data correctly. These data included: flight information, route information, fuel and mass data, weather and wind data, climb and descent data, list of airports en route and remarks. After first reading, Copilot did not show any mistake made. Some small differences in the outputs were noticed (style of the report, distribution of the data in the categories)

In the **first check for mistakes**, Copilot was asked to check the OFPs for errors made, before the plan could be submitted. Copilot identified and verified the plans based on the criteria: Route verification, fuel calculation, weather data, mass & balance calculations, compliance with regulations. The criteria selected by Copilot slightly varied from one OFP to another OFP. After this run, Copilot evaluated **4 out of 10 flights correctly (3 of them were correct, 1 erroneous plan contained underfuel), 4 flights were given recommendations to be checked further, 1 flight was mistakenly evaluated as correct and 1 flight was identified as correctly planned, but needs further check for the current feasibility.**

In the second run, Copilot was prompted to perform suggested recommendations and check the measures. After this verification, **1 more flight plan was correctly evaluated as correct, 3 flights were evaluated incorrectly, as Copilot made a mistake in the fuel calculation, and did not identify the correct issue.**

In the third prompt run, Copilot was in case of the remaining, incorrectly evaluated flight plans guided to make the correction.

The outcome of the flight plan, containing only DCT instead of the route, **was evaluated as questionable**, since the Copilot stated, that this is permissible for a short flight, as the used flight plan (Biggin Hill to London City). After talks with the experienced flight dispatcher, such a plan can be used in some cases, however, in this state, it might not be accepted from Eurocontrol system)

The flight plan, containing alternate airport far from the destination airport, was evaluated after correcting wrong fuel calculations as correct. However, the outcome of the system did

not suggest, the flight dispatcher to change the alternate airport. After asking the Copilot for better alternates, Copilot provided satisfactory results. Therefore, the outcome was evaluated still as undesirable.

In the flight plan, without the appointed captain of the flight, Copilot did mistakes in the fuel calculations, as it did not count with discretionary fuel, persuading the user, that its calculations are still correct. Copilot did not deduce the pilot written in the second line of the block, and assumed the abbreviation CC as the Captain, instead of the cabin crew. Therefore, the flight was evaluated as not correct.

While checking the feasibility of the flight based on the current conditions, the weather information METAR, TAF and NOTAM were compared with the actual data from Windy.com. From the provided data by it can be concluded, that Copilot cannot evaluate the conditions, cannot provide the correct and valid METAR, TAF and NOTAM information for all the flights tested. Therefore, also the flight into the military zone was evaluated by Copilot as feasible and the desirable outcome not reached.

As a summary, 5 of the flight plans were identified and checked correctly by the Copilot (4 of them were correctly planned and 1 contained mistake in the underfuel). 4 other flights were evaluated wrongly by the Copilot, resulting from making mistakes in fuel calculations and misreading and misinterpreting the data from the OFP. 1 outcome of the flight plan (containing DCT instead of the route), was evaluated as questionable.

4. Conclusion

As **benefits** of using the Copilot, can be stated:

- **Microsoft Copilot can provide a good review of the flight:** As after submitting the flight plan, data read and provided by Copilot were satisfactory. Copilot can still make mistake, so this data must be read with caution.
- **Good suggestions on alternate airports:** After analysing the OFPs from Copilot, suggestions provided by the Copilot were satisfactory, which was proved in two cases.

Common bottlenecks in the usage of Copilot

- **Variability and inconsistency of the outputs** – Copilot provided for every OFP slightly different outputs, with different selected criteria for the route verification.
- **Incorrect reading from the Flight Plan** – 2 flight plans were not properly read by the Copilot, in the section of fuel calculations.
- **Errors in fuel calculations** – In two cases, Copilot did not correctly include discretionary fuel in the total fuel calculation, indicating mistakes in the fuel calculations.
- **Incorrect searching for and processing information, with frequent changes in time** – Copilot cannot work well with data that frequently changes in time. These include weather reports, NOTAMs and other important information for planning the flight.

- **Common habits and company standard procedures are not assumed** – Information which are not written in the OFP and Copilot does not know about them, are not taken into consideration. That includes assumptions about the character of the airline operations (state, civil, military), flight crew composition (Captains are in the crew lists written on the first line, First officers in the second line and CC states for Cabin crew).

Therefore, it can be stated, that the current state of the development Copilot cannot fully replace the experience of the flight dispatcher and his learning process. Therefore, the company should consider whether to implement such a solution in its OCC environment. However, Copilot can give satisfactory suggestions and advice to flight dispatchers in the process of flight planning. The experience of the flight dispatcher and the check of current valid information should not be omitted.

Before introducing such a solution into the workplace, the company should consider introduction of the AI norm which would address the employees:

- **Allowed AI Tools**
- **Scope of activities, where AI can be applied** (suggestions to the flight plan, translating the e-mails)
- **Labelling of the documents and communication, where AI was used.**
- **Creating the process of making employees aware** (training, signing the norm...)
- **Validating process and period** – how often and when the norm should be updated

Overall, it can be concluded that the flight dispatcher's way of work will change in a few years with the development of technology. Artificial intelligence provides promising results in the future, but AI must undergo multiple years of development and training. Its current possible role in the environment of the operations control centre can be defined as an advisor, giving suggestions to flight dispatchers and making their decision-making process faster and easier. It would be appropriate to check the current results of the research and compare them with different AI models developed after some time, based on the same methodology and reevaluate the outcomes of the models.

References:

- [1] **SKYBrary**, Operations Control Centre (OCC) Available at: <https://skybrary.aero/articles/operations-control-centre-occ>
- [2] **CHALÁS, Tomáš**, 2023, Analýza operačného oddelenia leteckej spoločnosti – Bakalárska práca, Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov, Katedra leteckej dopravy
- [3] **ABS Jets**, OCC Manual, 14/09/2020
- [4] **EASA**, Artificial Intelligence Roadmap 2.0, 05/2023
- [5] **ANDRÉ Antoine-Alexandre**, **European Commision DG CNECT**, The AI Act and its impact on the aviation sector - presentation Available at:

<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-04/20240429-flyai-forum-session-2-andre.pdf>

[5] **IBM**, What is machine learning? 22/09/2021, Available at: <https://www.ibm.com/think/topics/machine-learning>

[6] **Regulation (EU) 2024/1689** – EU AI Act, 13/06/2024

[7] **Microsoft**, website of Microsoft Copilot, 18/04/2025
Available at: <https://www.microsoft.com/sk-sk/microsoft-copilot/organizations>



PROJEVY KLIMATICKÉ ZMĚNY NA VYBRANÝCH LETIŠTÍCH SLOVENSKA

Alena Janošková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Miriám Jarošová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The topic of this article is focused on the impact of climate change on the increasing tendency in the occurrence of hazardous weather phenomena at selected airports in Slovakia. The aim of the article is to confirm or refute the influence of climate change on the increasing frequency of meteorological phenomena in the specified time frame from 2000 to 2019 by means of a comprehensive statistical analysis and statistical summarization of meteorological data. The first part of the article defines the basic terminology related to the climate change and specifies the importance of addressing the issue in the context of aviation safety. For the practical part of the article meteorological reports provided by the Slovak Hydrometeorological Institute were used. In the practical part, various statistical methods, and a comprehensive evaluation of the frequency of individual weather phenomena during the analyzed years, were used. The hypothesis of increasing frequency of weather phenomena over the years was statistically confirmed only for thunderstorm activity at one meteorological station.

Keywords

air transport, climate change, dangerous meteorological phenomena, global warming, aviation meteorology

1. Úvod

Globálně je zaznamenáván nepřetržitý technologický rozvoj, který přímo úměrně souvisí s demografickým přírůstkem a také nadbytečnými požadavky lidské civilizace a její závislosti na různých typech zdrojů. Přestože v prvopočátcích industrializace se tyto jednotlivé pokroky zdály pro fungování lidské společnosti ulehčující a prosperující, jejich důsledky se dramaticky začaly podepisovat masivním poškozováním životního prostředí. Klimatický systém naší planety se v minulosti přirozeně několikrát dlouhodobě i krátkodobě měnil a také se jeho přirozené změny v budoucnu očekávají. Klimatickou změnu a její důsledky, které pozorujeme v současné době, ovšem nelze přisuzovat přirozenému kolísání klimatického systému, které probíhalo v minulosti, nýbrž nenávratným důsledkům antropogenních zásahů. Klimatická změna a její projevy v globálním rozsahu se negativním způsobem dotýkají i sektoru letecké dopravy. Pro leteckou dopravu představuje změna klimatu určitou výzvu nejen po obchodní a ekonomické stránce, ale především představuje bezpečnostní překážky z pohledu růstu četnosti a zvýšení intenzity pro letectví nebezpečných meteorologických jevů. Cílem tohoto vědeckého článku je kontinuálně navázat na tuto problematiku z hlediska sledování růstu a variability výskytu těchto nebezpečných povětrnostních jevů v průběhu let s ohledem na probíhající klimatickou změnu a nabídnout také komplexní sumarizaci a statistickou analýzu nasbíraných dat, která vykreslí vývoj četnosti výskytu povětrnostních jevů na dvou vybraných slovenských letištích.

1.1. Teoretická východiska

První část tohoto článku obzámkuje se základní terminologií a pojmoslovím týkajícím se klimatické změny a také propojením této problematiky v kontextu narušení plynulosti a bezpečnosti letecké dopravy.

1.1.1. Klimatická změna

Klimatická změna je obecně definována jako vývoj podnebí, který se sleduje v uvažovaném časovém intervalu po relativně velmi dlouhou dobu v jednom směru, to znamená k oteplení či ochlazení. Projevy klimatické změny mohou být regionálního nebo globálního charakteru, kdy mohou působit různou intenzitou. Jedná se o dlouhodobou změnu meteorologických prvků, což následně ovlivňuje i klimatologické charakteristiky. Klimatický systém naší planety je přirozeně podmíněn rozličnými klimatotvornými faktory. Z tohoto důvodu je nutné rozlišovat pojem změny klimatu týkající se změny způsobené přirozenými faktory, či momentálně nejdiskutovanějším problémem, a to změnou klimatu, která je antropogenně podmíněná růstem skleníkového efektu od začátku průmyslové revoluce [1,2,3,4,5].

1.1.2. Projevy klimatické změny v sektoru letecké dopravy

Vliv klimatické změny je provázaný se změnou režimu počasí v celosvětovém měřítku. Narůstá projev extrémnosti určitých povětrnostních prvků, jedná se například o silné bouřky, tropické cyklóny nebo vlny veder. Dalším projevem jsou také významné změny cirkulačních podmínek. Na základě rozličných mechanismů podporuje současná změna klimatu extrémnost těchto již extrémních povětrnostních jevů. Všechny tyto formy změn projevu a intenzity povětrnostních prvků se mohou negativně projevit ve všech aspektech sektoru letecké dopravy [6,7].

Dle poslední hodnotící zprávy o změně klimatu, kterou vydává nezávislý orgán IPCC (Mezinárodní panel pro změnu klimatu), je častěji zaznamenáván výskyt extrémních vysokých teplot vzduchu ve srovnání s 50. roky minulého století. Nárůst globální povrchové teploty s sebou nese řadu pro letectví nežádoucích a nebezpečných dopadů. Faktor vysokých teplot se značně negativně projevuje například na výkonnostních charakteristikách letadel generováním nižšího aerodynamického vztlaku. Od problému rostoucích teplot se

také odráží veškeré změny v režimech dalších povětrnostních jevů. Sumárně teplota vzduchu ovlivňuje prostorově i časově stav atmosféry a podílí se na veškerých fyzikálních procesech [7,8,9,10].

V souvislosti s klimatickou změnou se mění také hydrologický cyklus planety. Konkrétně dochází v důsledku rostoucích teplot k jeho určitému urychlování. To se projevuje vyšší potenciální evaporací, která podporuje i vzniku vyšších srážkových úhrnů. V některých oblastech světa se naopak může globální oteplování projevit dlouhodobými obdobími sucha. Z hlediska rostoucích srážek se v určitých regionech mohou letiště potýkat se zaplavením VPD, pojezdových drah a další letištní infrastruktury nebo během letu mohou přinést výrazné snížení požadované dohlednosti [1,5,6,11,12].

Jedním z vůbec nejnebezpečnějších atmosférických jevů nejen pro leteckou dopravu je bouřka a její doprovodné jevy. Projevy bouřkové činnosti doprovází celá řada pro letadlo dalších nebezpečných jevů, mezi něž spadá námraza, turbulence, krupobití, sestupné a vzestupné proudy, snížení dohlednosti v případě srážek, nárazy větru a také stříh větru. Tyto jevy jsou soustředěny v oblaku druhu cumulonimbus (v českém překladu bouřková kupa), na který se bouřka váže v jeho maximálním vývoji. V souvislosti s nárůstem průměrné teploty vzduchu, která je hlavním projevem globální změny klimatu a také dalších změn v klimatických prvcích a charakteristik přízemní vrstvy atmosféry, jsou očekávány možné změny v dynamice a také intenzitě projevu těchto specifických meteorologických úkazů. Očekávaný nárůst bouřkových činností i v budoucnu je podmíněn teplejší atmosférou, která je schopna udržovat větší množství vodní páry. Zvýšená vlhkost v přízemní vrstvě podporuje konvekční instabilitu atmosféry a také potřebné vzestupné proudění. Všechny tyto faktory vytváří nevyhnutné předpoklady pro vznik a vývoj bouřkového oblaku. Mimo bezpečnostní rizika spojená s letovou způsobilostí a výkonností letadla představuje nárůst a zvýšení intenzity projevu bouřkové činnosti také narušení plynulosti průběhu leteckého provozu a provozu letišť z hlediska možných zpoždění či zrušení letů, omezení provozního využití vzletových a přistávacích drah, poškození či disfunkci některých letištních zařízení [1,5,6,11,12,13,14].

Určité změny ve variabilitě a intenzitě jsou očekávány také ve větrných podmínkách, přičemž na tyto změny je potřebné včasné reagovat, poněvadž vítr ovlivňuje bezpečnost letadla ve všech fázích letu. Ve spodní troposféře se očekávají změny v síle větru a také jeho směru, což může ovlivnit letadla zejména v kritických fázích letu. V horní troposféře jsou predikovány změny v projevech tryskového proudění neboli jet streamu. V rámci zesílení a změn prostorového rozložení bouřek se letadla mohou dostat do nebezpečných situací s nárazovitým větrem či vertikálním a horizontálním stříhem větru. Očekávány jsou také změny v projevech turbulence, zejména je často zmiňována turbulence v bezoblačném prostředí [15].

2. Metodika a metody zkoumání

Cílem vědeckého článku je souhrnná statistická analýza meteorologických dat v průběhu stanoveného období dvaceti let od roku 2000 do roku 2019, která pomůže potvrdit či vyvrátit výzkumnou otázku o vlivu změny klimatu na zvyšující se tendence četnosti a variability vybraných pro letectví

nebezpečných povětrnostních jevů na vybraných letištích Slovenska.

V rámci primární stanovené hypotézy je zkoumána závislost dvou proměnných. Konkrétně vyjadřuje vztah mezi přibývajícím četností zvolených povětrnostních jevů s přibývajícím roky v rámci analyzovaného období.

Data relevantní pro zpracování praktické části výzkumu v rámci vědeckého článku byla poskytnuta od Slovenského hydrometeorologického ústavu. Konkrétně se jednalo o meteorologické zprávy METAR vydané v období od roku 2000 do konce roku 2019. Pro výzkum byly zvoleny dvě letiště: Letiště M. R. Štefánika (meteorologická stanice Bratislava-letisko) a Letiště Košice (meteorologická stanice Košice-letisko). Výběr meteorologických stanic byl stanoven cíleně vzhledem k odlišnostem v klimatických, topografických a orografických podmínkách těchto dvou oblastí. Pro statistický výzkum byly vybrány tři hlavní skupiny povětrnostních jevů. Jedná se o oblak druhu cumulonimbus a na něj navazující se bouřková činnost, silný vítr a také atmosférické srážky, které byly rozděleny do několika podskupin.

Z rozsáhlého souboru dat ve formátu meteorologických zpráv bylo potřebné vyfiltrovat pouze data relevantní pro daný výzkum. Tento krok byl učiněn pomocí programovacího nástroje. Z tohoto souboru dat s meteorologickými zprávami METAR, který obsahoval v některých případech vícečetný výskyt pozorovaných prvků během jednoho dne, byla pro jednoduchost jeho přítomnost vždy evidována pouze jednou v rámci daného konkrétního dne.

3. Výsledky

Navazující část článku se již zaměřuje na detailní statistické zpracování a analýzu nasbíraných dat ve formátu meteorologických zpráv METAR a celkové zhodnocení vývoje a změny charakteru vybraných meteorologických jevů v časovém rozhraní dvaceti let. Tyto statistické metody na základě korelační a regresní analýzy a veškeré grafické zpracování byly provedeny pomocí softwaru MS Excel.

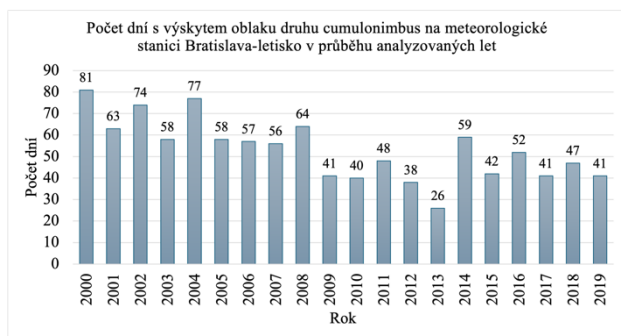
3.1. Zhodnocení vývoje výskytu oblaku druhu cumulonimbus

V rámci první části zpracování údajů z meteorologických zpráv METAR byl pozorován vývoj počtu dní s výskytem mohutného a nebezpečného oblaku druhu cumulonimbus.

3.1.1. Počet dní s výskytem bouřkového oblaku na LZIB

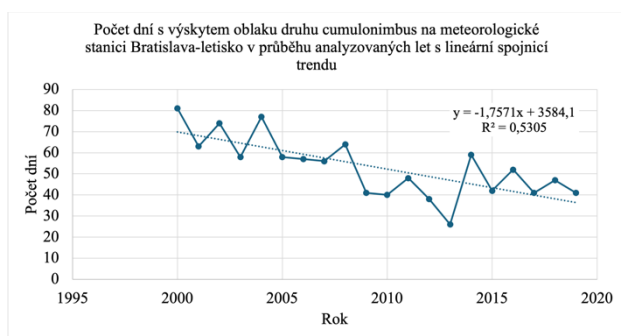
Při zpracování relevantních dat s výskytem bouřkového oblaku z meteorologické stanice Bratislava-letisko a agregace příslušných dat na jednotlivé dny vykazoval celkový počet dní s pozorovaným výskytem bouřkového oblaku hodnotu 1063 dní.

Dle následujícího grafického zpracování vývoje počtu dní s výskytem cumulonimbu lze pozorovat poměrně nestabilní trend vývoje v jednotlivých letech. Výsledky této trendové analýzy poukazují na určitý pokles počtu dní s výskytem cumulonimbu v průběhu let. Nejedná se ovšem o homogenní pokles.



Graf 1 Počet dní s výskytem oblaku druhu cumulonimbus na LZIB

Pro optimálnější a přesnější identifikaci trendu byl využit také lineární regresní model k analytickému zpracování závislosti závislé proměnné (počtu dní s výskytem oblaku druhu cumulonimbus) od nezávislé proměnné (vývoje časové řady). Klesající trend zde potvrzují výsledky grafického zpracování s lineární spojnicí trendu. Na základě rovnice se zápornou směrnici i průběhu křivky lze vyčíst klesající trend počtu dní s výskytem bouřkového oblaku v průběhu času. Navíc hodnota *koeficientu determinace*, který se označuje R^2 , procentuálně vyjadřuje, že je tento model spolehlivý z přibližně 53 %. Následně byl také vypočítán *koeficient korelace*, jehož hodnota dosáhla -0,73. Tento výsledek indikuje, že je mezi proměnnými středně silná závislost a proměnné jsou nepřímo lineárně závislé, což se projevuje klesajícím charakterem. K ověření skutečnosti, jestli se jedná o statisticky významný vztah či nikoli, byla využita takzvaná *nulová hypotéza*, která tvrdí, že proměnné jsou lineárně nezávislé. Z tohoto důvodu je potřebné zjistit také takzvanou *p-hodnotu*, která bude následně porovnána na 5 % hladině významnosti (0,05). Z výpočtu bylo zjištěno, že *hodnota p* po zaokrouhlení dosahuje hodnoty 0,0003. Tato hodnota je značně nižší než stanovená hladina významnosti, tudíž *nulová hypotéza* se zamítá a přijímá se *hypotéza alternativní*, která tvrdí, že mezi proměnnými existuje v tomto období statisticky významný vztah a proměnné jsou nepřímo lineárně závislé.

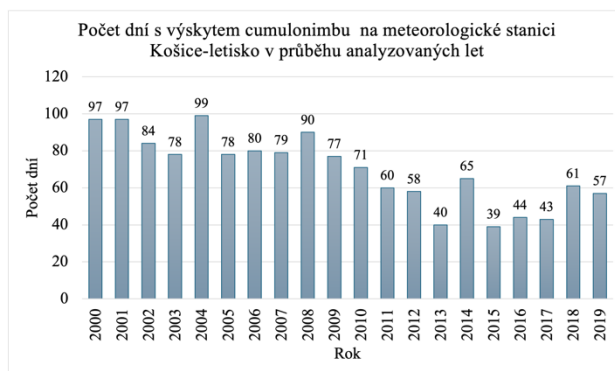


Graf 2 Počet dní s výskytem oblaku druhu cumulonimbus na LZIB s lineární spojnicí trendu

3.1.2. Počet dní s výskytem bouřkového oblaku na LZKZ

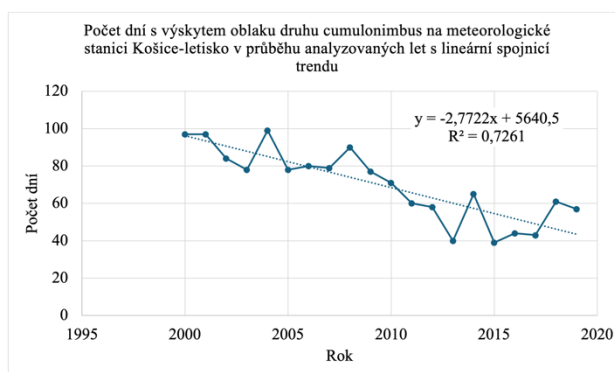
V případě meteorologické stanice Košice-letisko bylo po převedení na denní hodnoty zaznamenáno celkem 1 397 dní s výskytem bouřkového oblaku.

Podobně jako u grafického zpracování naměřených hodnot na meteorologické stanici Bratislava-letisko lze i na následujícím grafu vyzorovat určitý klesající trend v průběhu let.



Graf 3 Počet dní s výskytem oblaku druhu cumulonimbus na LZKZ

Viditelný klesající trend počtu dní s výskytem bouřkového oblaku bude potvrzen také využitím lineárního regresního modelu. Spolehlivost modelu s klesající linearitou také potvrzuje i vyšší procentuální hodnota *koeficientu determinace*, která činí 72,6 %. Pro určení intenzity závislosti těchto dvou proměnných je potřebné zjistit také hodnotu *korelačního koeficientu*. Hodnota vypočteného *korelačního koeficientu* ($r = -0,85$) indikuje silnou nepřímo lineární závislost mezi proměnnými vyznačující se poklesem četnosti dní s bouřkovým oblakem v průběhu let. Pro ověření tohoto tvrzení je nutné položit si opět *nulovou hypotézu* a provést *test významnosti* pro určení statistického významu této závislosti. Po dalším výpočtu *p-hodnoty*, která dosáhla velmi nízké hodnoty 1,8561E-06, lze vyvrátit *nulovou hypotézu* a přijmout *alternativní hypotézu*, která konstatuje, že mezi zkoumanými proměnnými existuje statisticky významná závislost a proměnné jsou nepřímo lineárně závislé.



Graf 4 Počet dní s výskytem oblaku druhu cumulonimbus na LZKZ s lineární spojnicí trendu

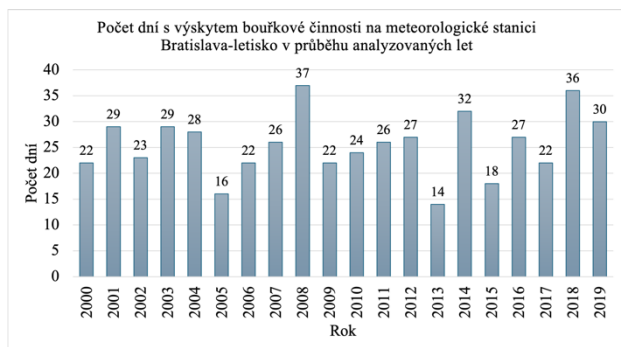
3.2. Zhodnocení vývoje výskytu bouřkové činnosti

Dalším potenciálně nebezpečným jevem vybraným pro statistické zhodnocení je bouřková činnost, která vzniká mezi bouřkovými oblaky cumulonimbus zkoumanými v předešlé podkapitole.

3.2.1. Počet dní s výskytem bouřky na LZIB

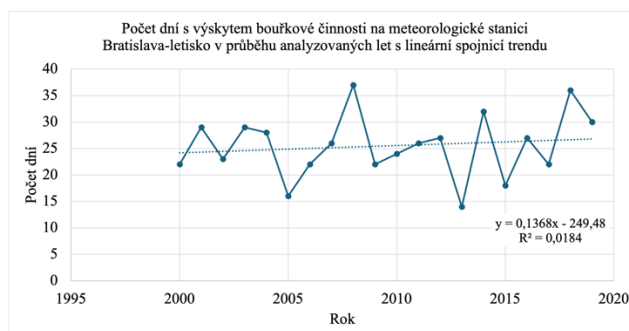
Na meteorologické stanici Bratislava-letisko po roztřídění a seskupení náležitých dat podle dnů vykazoval celkový počet dní s výskytem bouřky v celém zkoumaném období hodnotu 510 dní.

Následující sloupkový graf podává přehled o značně kolísavých hodnotách v průběhu jednotlivých let. Nelze zde vymezit ani žádný výrazný trend, který by naznačoval určité změny ve výskytu bouřek v rámci analyzovaného období.



Graf 5 Počet dní s výskytem bouřky na LZIB

Pomocí grafického zpracování s lineární spojnicí trendu však můžeme identifikovat mírně rostoucí trend na základě kladné směrnice v rovnici i průběhu samotné lineární spojnice. Tento trend však nelze potvrdit, jelikož *koeficient determinace* udává, že tento model je spolehlivý pouze z 1,84 %. Pro stanovení směru a síly závislosti je potřebné zjistit výsledky *korelačního koeficientu*, který vykazuje kladnou hodnotu 0,14. Kladné znaménko *koeficientu korelace* udává, že jsou proměnné přímo lineárně závislé, tedy počet dní s bouřkovou činností roste v čase. Ovšem tato nízká hodnota poukazuje na pouze slabou závislost mezi proměnnými. Pro potvrzení této skutečnosti zvolíme *nulovou hypotézu*, která pomůže určit statistickou významnost či naopak nevýznamnost těchto zkoumaných proměnných na základě *p-hodnoty*, po jejímž výpočtu byla zjištěna hodnota 0,57. Jelikož je tato hodnota vyšší než stanovená hodnota *hladiny významnosti*, *nulová hypotéza* je přijata. To znamená, že v tomto stanoveném období nelze s jistotou říci, že četnost dní s bouřkovou činností v průběhu let narůstá, ale také nelze tvrdit, že mírně rostoucí trend zde neexistuje. Jen není podložený dostatečným množstvím dat.

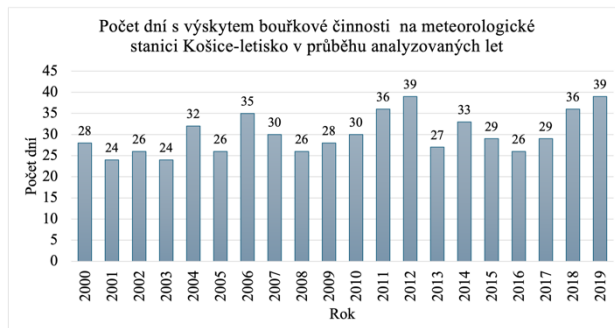


Graf 6 Počet dní s výskytem bouřky na LZIB s lineární spojnicí trendu

3.2.2. Počet dní s výskytem bouřky na LZKZ

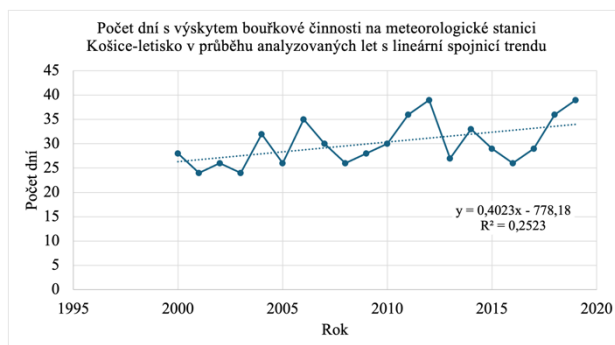
Po seskupení dat ve formátu meteorologických zpráv na jednotlivé dny představoval počet v pozorovaném období celkem 603 dní s výskytem zkoumaného jevu na příslušné stanici. Vyšší četnost dní s bouřkou také potvrzuje vliv kontinentality podnebí na tuto oblast, kdy jsou zde celkově příhodnější podmínky pro vznik a vývoj bouřkové činnosti.

Dle grafického zpracování níže lze konstatovat, že jednotlivé hodnoty v průběhu let vykazují nepravidelné výkyvy a jsou poměrně proměnlivé. Opět se zde nedá určit jasný trend, který by kopíroval očekávaný rostoucí charakter četnosti bouřek v průběhu let.



Graf 7 Počet dní s výskytem bouřky na LZKZ

Zpracování následujícího grafu s lineárním regresním modelem napomohlo konkrétní identifikaci trendového vývoje v průběhu let. Konkrétně lze vypočítat rostoucí trend na základě kladné směrnice v rovnici i rostoucí lineární spojnice trendu. Je však nutné ověřit také statistické výsledky koeficientů. *Koeficient determinace* dosahuje hodnotu přibližně 0,2523. Respektive 25,23 % této kladné rostoucí závislosti lze popsat tímto lineárním modelem. To potvrzuje také výsledek *koeficientu korelace*, jehož hodnota dosáhla 0,5. Kladné znaménko výsledné hodnoty dedikuje skutečnost, že jsou proměnné přímo lineárně závislé a hodnota 0,5 určuje sílu korelace jako středně silnou závislost mezi proměnnými. Na základě výpočtu *p-hodnoty* (0,02) lze na *hladině významnosti nulovou hypotézu* zamítnout a přijmout *alternativní hypotézu*, která tvrdí, že mezi proměnnými je statisticky významná závislost a proměnné jsou přímo lineárně závislé. Počet dní s výskytem bouřkové činnosti v tomto analyzovaném období v letech roste.



Graf 8 Počet dní s výskytem bouřky na LZKZ s lineární spojnicí trendu

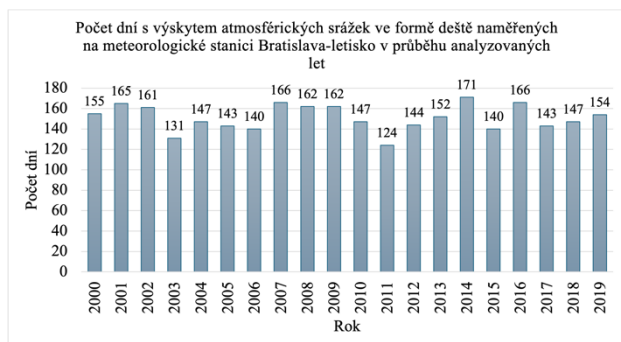
3.3. Zhodnocení vývoje výskytu dešťových srážek

První část statistického výzkumu a následné analýzy se věnuje atmosférickým srážkám ve formě deště.

3.3.1. Počet dní s výskytem dešťových srážek na LZIB

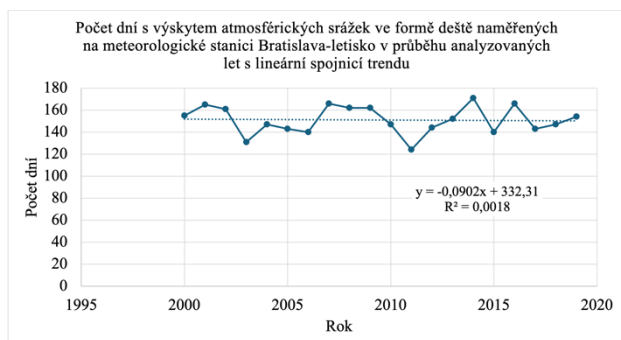
Po kumulaci meteorologických zpráv a převedení na jednotlivé dny představoval celkový počet 3 020 dní s výskytem dešťových srážek v celém analyzovaném období.

Následující graf ilustruje poměrně konzistentní trend vývoje počtu dní s dešťovými srážkami v průběhu všech zkoumaných let s malými výkyvy.



Graf 9 Počet dní s výskytem dešťových srážek na LZIB

V rámci využití lineárního regresního modelu byly zjištěny detailnější informace o závislosti zkoumaných proměnných. Již z následujícího grafického zpracování lze vypožorovat velmi mírně klesající trend spojnice, což potvrzuje i záporná hodnota směrnice v regresní rovnici. Ovšem *koeficient determinace* vykazuje zanedbatelnou nulovou hodnotu. Model proto nelze považovat za spolehlivý a také nelze určovat podnětné souvislosti mezi počtem dní s výskytem dešťových srážek v průběhu jednotlivých let. To potvrzuje také výsledná hodnota *koeficientu korelace* ($r = -0,04$). Tato hodnota značí pouze velmi slabou nepřímou lineární závislost mezi proměnnými. Na základě *testu významnosti* a výpočtu potřebné *p-hodnoty* (0,86) se potvrdila také *nulová hypotéza*. Respektive lze konfirmovat lineární nezávislost mezi četností dní s dešťovými srážkami v průběhu let v tomto stanoveném období.



Graf 10 Počet dní s výskytem dešťových srážek na LZIB s lineární spojnici trendu

3.3.2. Počet dní s výskytem dešťových srážek na LZKZ

Po převedení rozsáhlého souboru dat na denní hodnoty bylo na meteorologické stanici Košice-letisko zaznamenáno celkem 2 820 dní s dešťovými srážkami. Podobně jako v případě hodnot zjištěných ze stanice Bratislava-letisko je zde celkový trend poměrně plynulý s nepatrnými odchylkami v určitých letech.



Graf 11 Počet dní s výskytem dešťových srážek na LZKZ

Podobně jako u meteorologické stanice Bratislava-letisko bylo nutné pro jasnější identifikaci trendu, který bude také statisticky podložen, využít lineární regresní model. Spojnice lineárního regresního modelu naznačuje mírný pokles dešťových srážek v průběhu let. *Koeficient determinace* však opět vykazuje zanedbatelně nízkou hodnotu, tudíž je nutné brát ohled na velmi nízkou spolehlivost tohoto modelu. To stejné potvrzuje také hodnota *koeficientu korelace* ($-0,08$), jejíž záporné znaménko a hodnota vyjadřuje skutečnost, že jsou proměnné nepřímo lineárně závislé a je mezi nimi slabý až zanedbatelný vztah. Z tohoto důvodu nelze konstatovat, že atmosférické srážky ve formě deště v průběhu let postupně klesají. To dokládají také výsledky vypočítané *p-hodnoty* (0,74). Vzhledem ke stanovené *hladině významnosti* můžeme potvrdit *nulovou hypotézu* a konstatovat, že mezi proměnnými není lineární vztah. V tomto časovém rámci se nepotvrdila statistická závislost snižování četnosti deštivých dní v průběhu času.



Graf 12 Počet dní s výskytem dešťových srážek na LZKZ s lineární spojnici trendu

3.4. Zhodnocení vývoje výskytu sněhových srážek

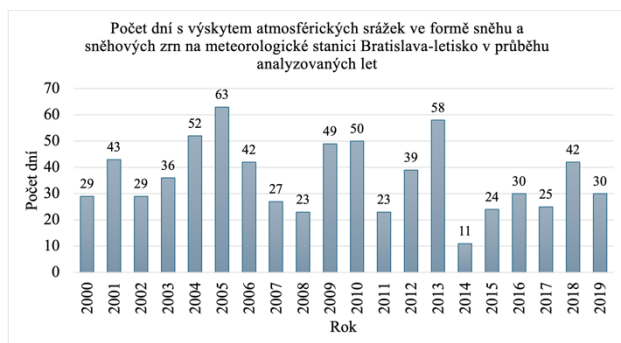
V rámci sledování variability četností atmosférických srážek vlivem změny klimatu byly zkoumány také srážky sněhové.

3.4.1. Počet dní s výskytem sněžení na LZIB

Po sumarizaci nasbíraných dat a převodu na jednotlivé dny představoval celkový počet dní s výskytem sněžení na meteorologické stanici Bratislava-letisko hodnotu 725 dní.

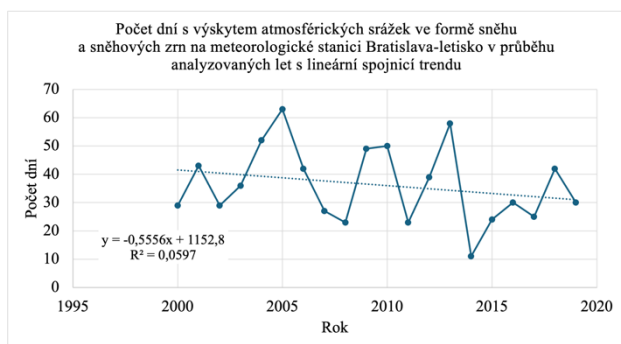
Z následujícího sloupcového grafu lze vypožorovat určitý nestabilní trend, který je ovlivňován velkými odchylkami v průběhu analyzovaného období, kdy v některých letech

dosáhla početnost dní se sněžením velkých hodnot, naopak v některých letech je sledován značný pokles.



Graf 13 Počet dní se sněžením na LZIB

Pro statistické zhodnocení je následující spojnicový graf proložen lineární spojnici trendu, která naznačuje pokles početnosti dní s výskytem sněhových srážek v průběhu jednotlivých let i na základě záporné směrnice v regresní rovnici. Tato vzájemná linearita ovšem není dostatečně podložena, poněvadž koeficient determinace vykazuje spolehlivost tohoto modelu pouze na 5,97 %. Také výpočet hodnoty korelačního koeficientu (-0,24) potvrdil, že je mezi proměnnými pouze slabá závislost a proměnné jsou nepřímo lineárně závislé. Pro prokázání statistické nezávislosti byl proveden také test významnosti a doplňkově zjištěna i *p-hodnota* (0,3). Na hladině významnosti vzhledem k vyšší hodnotě *p* nelze nulovou hypotézu zamítnout. Mezi proměnnými v tomto případě nelze potvrdit lineární vztah a je stanoveno, že proměnné jsou lineárně nezávislé.

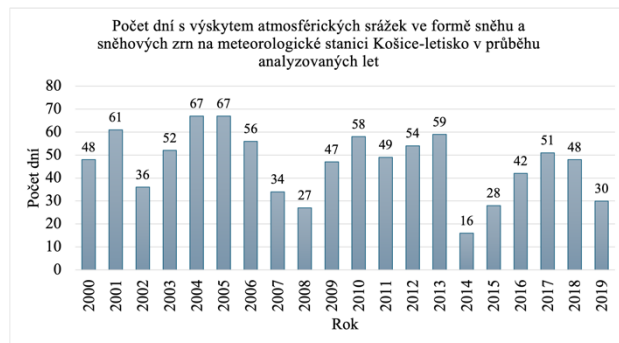


Graf 14 Počet dní se sněžením na LZIB s lineární spojnici trendu

3.4.2. Počet dní s výskytem sněžením na LZKZ

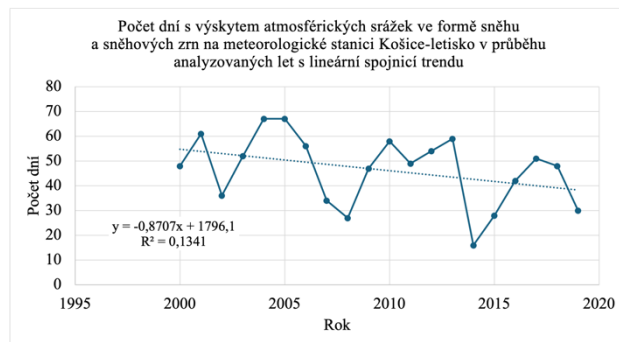
Počet dní s výskytem atmosférických srážek ve formě sněhu a sněhových zrn za zkoumané období dosáhl na meteorologické stanici Košice-letisko celkové hodnoty 930 dní.

Přestože je četnost dní s výskytem sněžení v Košicích téměř ve všech letech zřetelně vyšší, existuje zde patrná podobnost z hlediska vývoje jednotlivých hodnot v čase s velkými odchylkami.



Graf 15 Počet dní se sněžením na LZKZ

Využití lineární spojnice trendu pomohlo identifikovat mírně klesající trend v průběhu analyzovaného období. Koeficient determinace vykazuje procentuální hodnotu 0,1341, což znamená, že záporná závislost a mírně klesající trend lze vysvětlit tímto modelem ze 13,4 %. Výsledky korelačního koeficientu vykazují hodnotu -0,37. Tato hodnota určuje středně silnou nepřímou lineární závislost mezi proměnnými, tedy klesajícím počtem dní s výskytem sněhových srážek v průběhu jednotlivých let. Pro ověření a prokázání statistické závislosti je potřebné stanovit také nulovou hypotézu. Tato hypotéza, která tvrdí, že mezi analyzovanými proměnnými neexistuje statisticky významný vztah, byla na základě vyšší vypočtené *p-hodnoty* (0,11) potvrzena. Výsledný středně silný vztah četnosti dní se sněžením a jednotlivými roky ovšem není statisticky průkazný. To neznamená, že mezi proměnnými neexistuje vůbec žádný vztah, pouze nasbíraná data tento vztah statisticky neprokázala.



Graf 16 Počet dní se sněžením na LZKZ s lineární spojnici trendu

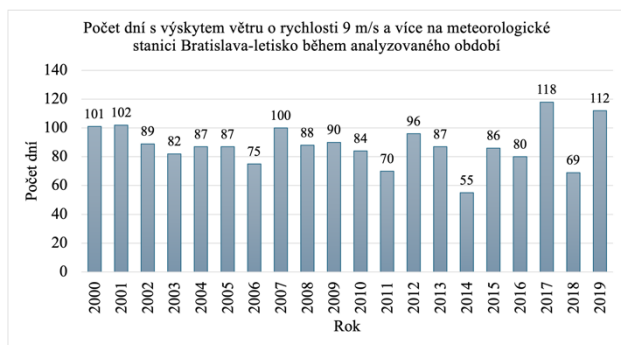
3.5. Zhodnocení vývoje silného větru

Jako třetí pozorovaný atmosférický jev byl určen vítr, jehož parametry byly stanoveny na rychlost 9 m/s a více.

3.5.1. Počet dní s výskytem větru o rychlosti 9 m/s na LZIB

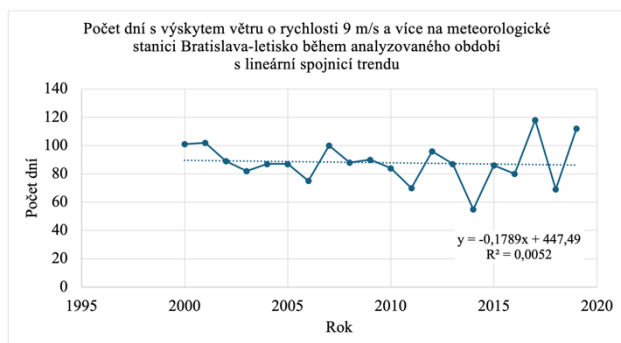
Po roztržení relevantních dat na jednotlivé dny představoval počet v pozorovaném období celkem 1 758 dní s výskytem zkoumaného jevu.

V následujícím grafickém sloupcovém zpracování lze opět pozorovat výrazné kolísání v průběhu jednotlivých let, kdy některé roky značně převyšují roky následující, nicméně zde opět nelze identifikovat přesný trend.



Graf 17 Počet dní s výskytem větru o rychlosti 9 m/s a více na LZIB

I z následujícího grafu s lineární spojnici trendu lze pozorovat poměrně stabilní trend s minimálním poklesem, který potvrzuje i záporná hodnota směrnice. Zápornou linearitu mezi proměnnými však nelze prokázat, jelikož *koeficient determinace* dosahuje zanedbatelných nulových hodnot. Tuto skutečnost potvrzuje i hodnota *koeficientu korelace* (-0,07), která udává, že mezi proměnnými je velmi slabá nepřímá lineární závislost. V tomto analyzovaném období nelze definovat žádná vazba ani závislost mezi počty dní s větrem dané rychlosti a průběhem jednotlivých let. Tato skutečnost byla i statisticky prokázána potvrzením *nulové hypotézy*, která byla přijata na základě vypočítané *p-hodnoty* (0,76). Na základě dostupných dat nebyl statisticky prokázán žádný vztah mezi mírně klesající početností dní s větrem o rychlosti 9 m/s a více v průběhu analyzovaných let.

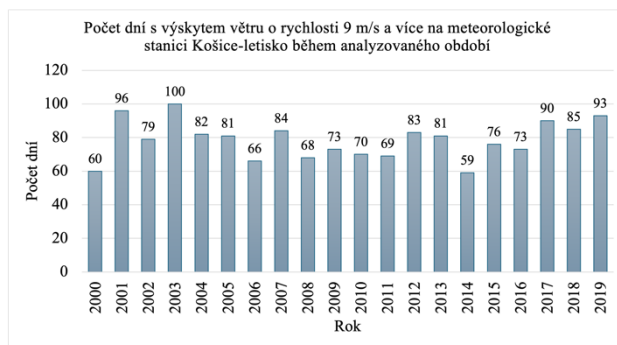


Graf 18 Počet dní s výskytem větru o rychlosti 9 m/s a více na LZIB s lineární spojnici trendu

3.5.2. Počet dní s výskytem větru o rychlosti 9 m/s na LZKZ

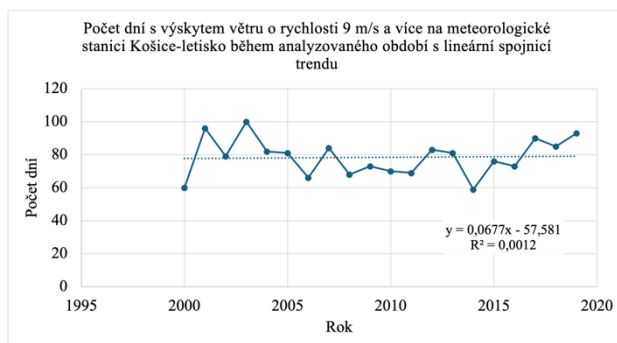
Po rozřídění náležitých dat podle dnů vykazoval celkový počet dní s výskytem větru o rychlosti stanovených parametrů a více v celém zkoumaném období hodnotu 1 568 dní.

Z následujícího sloupcového grafu, který ilustruje počty dní s výskytem větru o dané hraniční rychlosti lze pozorovat, že tyto hodnoty mají téměř konstantní charakter s mírnými výkyvy v letech.



Graf 19 Počet dní s výskytem větru o rychlosti 9 m/s a více na LZKZ

Dle následujícího spojnícového grafu s lineární spojnici trendu lze vypořadovat pouze nepatrný růst v průběhu let. Zde tuto vzájemnou linearitu nelze potvrdit, jelikož *koeficient determinace* opět dosahuje nulových hodnot, které naznačují, že je tento model nespolehlivý a nelze zde určit žádnou vzájemnou příčinnou vazbu mezi proměnnými. Vypočítaný *koeficient korelace* také dokládá tohle tvrzení, jelikož nabývá kladné hodnoty 0,04. Tato hodnota definuje, že se jedná o velmi slabou až zanedbatelnou přímou lineární závislost mezi proměnnými. V rámci *testu významnosti* a potvrzení *nulové hypotézy*, která byla ověřena porovnáním *p-hodnoty* (0,88) a hodnoty *hladiny významnosti*, bylo zjištěno, že vztah proměnných je statisticky nevýznamný. Prakticky lze konstatovat, že k růstu četnosti dní se silným větrem v průběhu stanovených let nedocházelo.



Graf 20 Počet dní s výskytem větru o rychlosti 9 m/s a více na LZKZ s lineární spojnici trendu

4. Závěr

Statistická významnost lineární závislosti dvou proměnných se prokázala pouze při výzkumu výrazného sestupného trendu četnosti dní s výskytem oblaku druhu cumulonimbus na obou stanicích v průběhu času. V rozporu s touto skutečností se statistická významnost potvrdila také na závislosti četnosti dní s bouřkovou činností v průběhu let, kdy na meteorologické stanici Košice-Letisko byl zaznamenán v průběhu analyzovaných let významný rostoucí trend frekvence tohoto jevu. Z tohoto hlediska se námi stanovená hypotéza potvrdila jen v tomto případě. Z hlediska sledování vývoje dešťových srážek byl na obou stanicích v průběhu let pozorován mírný pokles, který ovšem nebyl statisticky prokázán. Podobný klesající charakter vykazoval i trend ve vývoji výskytu sněhových srážek v tomto období, nicméně opět nebyla dokázána statistická významnost vztahu proměnných. Frekvence četnosti dní s výskytem větru o

stanovené rychlosti se odlišovala na obou stanicích s mírným nárůstem i poklesem také bez statistické významnosti.

Přestože se u většiny pozorovaných jevů neprokázaly statisticky významné závislosti, lze konstatovat, že určité souvislosti mezi nimi existují, s velkou pravděpodobností však nebylo sledované období dvaceti let dostatečně dlouhé, aby bylo možné tyto vzájemné vazby s jistotou prokázat a statistický model proto vyhodnotil tyto závislosti jako náhodné.

Reference

- [1] ČESKÁ METEOROLOGICKÁ SPOLEČNOST. *Elektronický meteorologický slovník (eMS)*. Online. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>. [cit. 2025-02-28].
- [2] BEDNÁŘ, Jan. *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-853-6845-5.
- [3] *Klimatická změna-fenomén současnosti*. Online. In: Akademie věd České republiky. 2020. Dostupné z: <https://www.avcr.cz/export/sites/avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/avex/files/2020-04.pdf>. [cit. 2025-03-02].
- [4] *Zmena klímy a jej príčiny*. Online. Slovenský hydrometeorologický ústav. 2025. Dostupné z: <https://www.shmu.sk/sk/?page=1790>. [cit. 2025-03-05].
- [5] HORÁK, Ján. *Klimatológia*. 2. vydání. Nitra: Vydavateľstvo SPU v Nitre, 2021. ISBN 978-80-552-2387-2.
- [6] *Človekom spôsobená zmena klímy*. Online. Slovenský hydrometeorologický ústav. 2025. Dostupné z: <https://www.shmu.sk/sk/?page=1071>. [cit. 2025-03-23].
- [7] *Scenáre budúcej klímy*. Online. Slovenský hydrometeorologický ústav. 2025. Dostupné z: <https://www.shmu.sk/sk/?page=1069>. [cit. 2025-03-24].
- [8] THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Online. Ženeva: IPCC, 2023. ISBN 978-92-9169-164-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>. [cit. 2025-03-23].
- [9] COFFEL, Ethan D.; THOMPSON, Terence R. a HORTON, Radley M. The impacts of rising temperatures on aircraft takeoff performance. Online. *Climatic Change*. 2017, roč. 144, č. 2, s. 381-388. ISSN 0165-0009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2018-9>. [cit. 2025-03-25].
- [10] COFFEL, E. a HORTON, R. Climate Change and the Impact of Extreme Temperatures on Aviation. Online. *Weather, Climate, and Society*. 2015, roč. 7, č. 1, s. 94-102. ISSN 1948-8327. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-14-00026.1>. [cit. 2025-03-25].
- [11] *Climate Change and Water*. Online. World Meteorological Organization (WMO). 2025. Dostupné z: <https://wmo.int/about-us/world-meteorological-day/wmd-2020/climate-change-and-water>. [cit. 2025-03-24].
- [12] GRATTON, G. B.; WILLIAMS, P. D.; PADHRA, A. a RAPSOMANIKIS, S. Reviewing the impacts of climate change on air transport operations. Online. *The Aeronautical Journal*. 2022, roč. 126, č. 1295, s. 209-221. ISSN 0001-9240. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/aer.2021.109>. [cit. 2025-03-25].
- [13] PECHO, Jozef. *Jej veličenstvo búrka*. Online. In: Akademický repozitár. 2025. Dostupné z: <http://www.akademickyrepozitar.sk/Jozef-Pecho/Jej-velicenstvo-burka>. [cit. 2025-03-25].
- [14] *Change in Thunderstorm Activity in a Projected Warmer Future Climate: a Study over Europe*. Online. 2017. Department of Earth Sciences, Uppsala University, 2017. ISSN 1650-6553. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Change-in-Thunderstorm-Activity-in-a-Projected-a-Emelie/644808c99176d812f075b9e70923076f48f039c2>. [cit. 2025-03-25].
- [15] *Climate Adaptation Synthesis*. Online. In: International Civil Aviation Organization (ICAO). 2018. Dostupné z: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Synthesis%20Report%20Factsheets/Aviation%20and%20Changing%20Wind.pdf>. [cit. 2025-03-25].



MĚŘENÍ PARAMETRŮ VĚTRU NA PALUBĚ ULTRALEHKÉHO LETADLA

Lukáš Kaltman
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Andrej Novák
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article addresses the issue of measuring wind parameters onboard ultralight aircraft with the aim of increasing pilot safety by providing relevant information about current weather conditions, specifically wind speed and direction. The theoretical part of the article analyzed the influence of wind on the flight characteristics of ultralight aircraft and examined existing wind monitoring options. Subsequently, an analysis of aircraft accident and incident data involving ultralight aircraft in the Czech Republic and Slovakia between 2019 and 2023 was conducted, revealing that wind negatively influenced 41 % of the analyzed events in the Czech Republic. Based on these findings, three potential solutions were proposed: establishing RADIO service at airfields for sport flying devices, installing windsocks at the ends of runways, and installing onboard electronic flight instrument systems capable of indicating the wind component. Using multi-criteria analysis, the installation of onboard instruments was evaluated as the most suitable option, as it offers the most accurate and up-to-date information directly during flight. In the experimental part, this option was preliminarily verified through two control flights at Sazená airfield using Garmin G3X systems. Comparison of data from the onboard instrument with data from ground meteorological stations showed that while the first flight yielded unrealistic results, the second flight showed better agreement, especially for wind direction, and the data from the onboard instrument corresponded more closely with the pilot's observations and the METAR report. It was concluded that onboard systems represent a promising solution, but more extensive research is necessary for definitive confirmation of their reliability. The article successfully identified a key risk factor, proposed a promising technical solution, and provided a theoretical and methodological basis for further research, thereby contributing to the main goal of increasing the safety of flying ultralight aircraft.

Keywords

Ultralight aircraft, aircraft accident, pilot safety, wind measurements

1. Úvod

Letecká doprava v segmentu ultralehkých letadel čelí specifickým bezpečnostním výzvám, které vyplývají z jejich jedinečných konstrukčních charakteristik. Nižší maximální vzletová hmotnost, obvykle do 600 kg, a nižší letové rychlosti ve srovnání s většími letadly činí tyto stroje výrazně náchylnějšími k ovlivnění vnějšími povětrnostními podmínkami. Zejména vítr, jeho náhlé změny směru a rychlosti, porывy a s ním spojená mechanická či termická turbulence představují významné faktory ovlivňující stabilitu a ovladatelnost ultralehkého letadla. Adekvátní posouzení aktuální větrné situace a jejího potenciálního vlivu na letadlo v různých fázích letu je proto pro pilota ultralehkého letadla naprosto zásadním úkonem pro zajištění bezpečnosti. Nedostatek přesných, relevantních a včasných informací o větru, případně jejich nesprávná interpretace ze strany pilota, může vést k chybným rozhodnutím s potenciálně závažnými až fatálními následky. Riziko je obzvláště vysoké během kritických fází letu, jako je vzlet, počáteční stoupání, přiblížení a přistání, kdy je letadlo v malé výšce nad terénem a má nižší rychlost, což snižuje jeho setrvačnost a schopnost odolávat vnějším vlivům. Potřeba vybavit piloty ultralehkých letadel spolehlivými a aktuálními informacemi o větrné situaci, ideálně dostupnými přímo v kabině letadla, tak představuje naléhavou a klíčovou výzvu pro další zvyšování úrovně bezpečnosti v oblasti ultralehkého létání.

Hlavním cílem tohoto článku je přispět ke zvýšení bezpečnosti pilotů ultralehkých letadel prostřednictvím poskytování relevantních a snadno interpretovatelných informací o aktuálních povětrnostních podmínkách, se specifickým zaměřením na klíčové parametry větru, tedy jeho rychlost a směr. Pro komplexní uchopení této problematiky a dosažení

stanoveného cíle byl výzkum strukturován do několika logicky navazujících částí. V úvodní, teoretické části byl proveden detailní rozbor fyzikálních principů větru a jeho vlivu na aerodynamiku a letové charakteristiky ultralehkých letadel. Souběžně s tím byly pečlivě analyzovány a zhodnoceny stávající možnosti a metody monitorování větrné situace, které jsou pilotům ultralehkých letadel v současnosti k dispozici, a to jak z pohledu dostupného palubního technického vybavení, tak i metod získávání informací z externích zdrojů, například od letových provozních služeb či z meteorologických zpráv. Na tento teoretický základ plynule navázala empirická část zahrnující analýzu historických dat o skutečných leteckých nehodách a incidentech ultralehkých letadel v České republice a na Slovensku. Primárním účelem této analýzy bylo nejen stanovit nejčastější příčiny těchto událostí, ale především identifikovat a kvantifikovat roli větru jako přímého kauzálního nebo alespoň přispívajícího faktoru, čímž měla být empiricky potvrzena a zdůrazněna kritická důležitost řešení dané problematiky pro reálné zvyšování bezpečnosti provozu. S využitím poznatků získaných z teoretického rozboru a konkrétních výsledků analýzy nehod bylo následně přistoupeno k návrhu a formulaci potenciálních řešení, jejichž cílem je efektivně pomoci pilotům ultralehkých letadel lépe se vypořádat s nepříznivým vlivem větru během letu. V rámci této fáze bylo provedeno systematické a objektivní vyhodnocení navržených možností pomocí vícekritériální analýzy s cílem vybrat nejoptimálnější řešení z hlediska definovaných kritérií, jako jsou účinnost, přesnost, aktuálnost, proveditelnost a relevance pro specifické podmínky provozu kategorie ultralehkých letadel. Další klíčová fáze výzkumu pak zahrnovala experimentální ověření funkčnosti a předběžné posouzení spolehlivosti zvoleného optimálního řešení v reálných provozních podmínkách. Cílem této praktické části bylo získání prvotních

zkušeností a dat o tom, jak navržené řešení funguje na palubě ultralehkého letadla a jak přesné údaje poskytuje ve srovnání s referenčními měřeními. Závěrečným krokem celého článku je syntéza všech získaných poznatků a vyhodnocení opodstatněnosti a správnosti zvoleného řešení na základě všech předchozích zjištění, primárně pak s ohledem na výsledky experimentálního ověření. Na základě této komplexní syntézy jsou formulovány hlavní závěry článku a vydána konkrétní doporučení jak pro případný navazující výzkum, tak pro potenciální praktickou implementaci výsledků v reálné praxi ultralehkého létání. Lze důvodně očekávat, že výsledky tohoto článku přinesou hlubší vhled do problematiky vlivu větru na provoz ultralehkých letadel a poskytnou cenné podklady pro návrh a implementaci konkrétních opatření směřujících k dalšímu systematickému zvyšování bezpečnosti létání v této dynamicky se rozvíjející kategorii letectví.

2. Metodika a metody výzkumu

Výzkum prezentovaný v tomto článku využíval kombinaci teoretických a empirických metod pro komplexní posouzení problematiky. Metodologický přístup zahrnoval několik klíčových kroků. Nejprve byla provedena detailní teoretická rešerše odborné literatury a relevantních leteckých předpisů jako L 14, LA 3 či UL 2. Tato rešerše se zaměřila na fundamentální pochopení větru, včetně jeho definice, parametrů jako rychlost a směr, mechanismů vzniku ovlivněných různými atmosférickými silami jako síla tlakového gradientu, gravitace, Coriolisova síla, tření a odstředivá síla, a geografickými faktory. Zvláštní pozornost byla věnována specifickému vlivu čelního, zadního a bočního větru na kritické fáze letu ultralehkých letadel, tedy vzlet a přistání, včetně podrobného popisu doporučených pilotních technik jako použití křidélek proti větru, vyšší rychlost odpoutání, skluzová a kurzová metoda pro kompenzaci snosu. Dále byly analyzovány nebezpečné meteorologické jevy úzce spojené s větrem, konkrétně různé typy turbulence – mechanická, termická, v úplavu – a stříhu větru – vertikálního i horizontálního, které představují významné riziko pro lehké letouny. Součástí rešerše byl i komplexní přehled a analýza stávajících metod a prostředků pro monitorování větru, které mají piloti k dispozici, od tradičních vizuálních indikátorů jako větrný rukáv jehož rozměry a umístění jsou standardizovány, přes standardizované meteorologické zprávy a předpovědi typu METAR, SPECI, TAF či SIGMET, až po různé komunikační a informační služby jako ATIS, letové provozní služby, AFIS a RADIO, poskytované na řízených i neřízených letištích. V neposlední řadě se teoretická část zabývala principy fungování a požadavky na palubní přístrojové vybavení relevantní pro měření letových parametrů a potenciálně i větru, včetně Pitot-statického systému a jeho možných chyb přiablokování Pitotovy trubice nebo statických portů, rychloměru a definic různých typů rychlostí IAS, CAS, EAS, TAS, GS, Machovo číslo, výškoměru a jeho závislosti na správném nastavení barometrického tlaku v Kollsmanově okně, variometru fungujícího na principu difference tlaků, globálních navigačních satelitních systémů jako GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou a augmentačních systémů jako WAAS či EGNOS, a moderních integrovaných systémů jako Air Data Computer ADC zpracovávající data z tlakových a teplotních senzorů a Attitude and Heading Reference System AHRS využívající gyroskopy, akcelerometry a magnetometry k určení polohy a orientace letadla.

Navazující empirická část se soustředila na sběr a analýzu dat o skutečných leteckých nehodách a incidentech. Byla shromážděna data ze všech dostupných závěrečných zpráv publikovaných českým Ústavem pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod ÚZPLN a slovenským Leteckým a námořním vyšetřovacím útvarem LNVÚ za pětileté období od začátku roku 2019 do konce roku 2023. Výběr zpráv se řídil jasnými kritérii: události se musely týkat buď ultralehkých letadel s maximální vzletovou hmotností do 600 kg, nebo letadel všeobecného letectví GA s maximální vzletovou hmotností do 2250 kg, a zprávy musely obsahovat dostatek informací pro provedení smysluplné analýzy. Celkem bylo do analýzy zahrnuto 18 závěrečných zpráv týkajících se ultralehkých letadel a 68 závěrečných zpráv týkajících se letadel GA. Data byla získána pečlivým manuálním pročením a sběrem informací z každé relevantní zprávy a následně byla strukturována do přehledné tabulky. U každé události byly zaznamenány klíčové parametry: přesné datum a země události, kategorie letadla dle MTOW a jeho imatrikulační značka, vyšetřovateli stanovená hlavní příčina nebo kombinace příčin události, explicitní zmínka o vlivu větru na průběh letu či vznik události, a případné další doplňující faktory ovlivňující vznik nehody. Příčiny událostí byly pro účely následné analýzy systematicky rozděleny do pěti hlavních kategorií: 1. Nesprávná technika pilotáže zahrnující chyby v řízení, 2. Nedodržování stanovených postupů nebo limitů, 3. Podcenění meteorologických podmínek včetně větru, turbulence, námrazy apod., 4. Technické závady na letadle neodhalené před letem, 5. Nedostatečná předletová příprava jako kontrola paliva, oleje, plánování. Následně byla provedena kvantitativní statistická analýza zaměřená na četnost událostí v jednotlivých letech a kategoriích letadel, na rozložení zjištěných příčin a především na statistické vyhodnocení explicitně zmíněného negativního vlivu větru na vznik nebo průběh analyzovaných událostí, a to odděleně pro Českou republiku a Slovensko. Pro hlubší porozumění komplexní souhře faktorů vedoucích k nehodě byly navíc detailně rozebrány tři konkrétní případy nehod ultralehkých letadel z analyzovaného souboru OK-KUU 81, OM-M919, OM-M505, u nichž hrál vítr prokazatelně významnou, i když ne nutně vyšetřovateli stanovenou primární, roli v kritických fázích letu.

Na základě poznatků získaných z teoretické rešerše a především ze závěrů analýzy nehod, která ukázala vysoký podíl událostí ovlivněných větrem, byla navržena tři potenciální technická nebo organizační řešení s cílem zlepšit informovanost pilotů ultralehkých letadel o aktuálních větrných podmínkách. Prvním návrhem bylo zavedení informační služby RADIO na vybraných neřízených plochách pro sportovní létající zařízení, která by aktivně poskytovala pilotům aktuální meteorologické informace včetně údajů o větru z přidružené stanice, což by vyžadovalo analýzu provozu na plochách, koordinaci s úřady a zajištění personálu a techniky. Druhým, jednodušším návrhem byla instalace dodatečných standardizovaných ukazatelů směru větru na oba konce vzletových a přistávacích drah na frekventovaných plochách pro lepší vizuální orientaci pilotů během vzletu a přistání. Třetím a technologicky nejpokročilejším návrhem byla podpora a případné rozšíření instalace moderních palubních elektronických letových přístrojových systémů, známých jako EFIS nebo "glass cockpit", které jsou schopny na základě dat z integrovaných senzorů jako ADAHS a GPS vypočítat a přehledně zobrazit aktuální vektor větru přímo na primárním letovém displeji pilota. Tyto tři návrhy byly následně

systematicky a objektivně porovnány a vyhodnoceny pomocí metody vícekritériální analýzy využívající vážený rozhodovací model. Bylo definováno sedm klíčových hodnotících kritérií relevantních pro posouzení praktické využitelnosti a celkového přínosu jednotlivých řešení: 1. Dosah a pokrytí poskytovaných informací pilotům, 2. Aktuálnost a četnost dostupných dat, 3. Přesnost a detailnost údajů o větru, 4. Regulační a administrativní náročnost implementace, 5. Pořizovací a dlouhodobé provozní náklady, 6. Snadnost integrace do stávajícího provozu a intuitivnost pro pilota, 7. Celková spolehlivost a odolnost navrhovaného systému. Každému kritériu byla expertně přiřazena váha odrážející jeho relativní důležitost pro hlavní cíl práce, tedy zvýšení bezpečnosti letů. Nejvyšší váhu získala kritéria aktuálnosti a četnosti dat 25 % a přesnosti informací 20 %, následovala kritéria dosahu a pokrytí a nákladů po 15 % a regulační náročnost a integrace po 10 %, nejnižší váhu 5 % měla spolehlivost. Každé ze tří navržených řešení bylo následně ohodnoceno expertním odhadem body na standardizované škále 1 až 5 pro každé z těchto sedmi kritérií a výsledné vážené skóre pro každou variantu pak určilo nejvhodnější řešení pro další zkoumání.

Poslední fází metodiky bylo experimentální ověření řešení, které bylo vícekritériální analýzou vyhodnoceno jako nejlepší, tedy palubních přístrojů EFIS. Pro ověření funkčnosti a předběžné posouzení přesnosti byla zvolena konkrétní avionika Garmin G3X, která je běžně dostupná a používaná v moderních ultralehkých letadlech a disponuje funkcí indikace větru. Byly uskutečněny dva samostatné kontrolní lety na letišti Sazená LKSA, které je typickým neřízeným letišťem s provozem ultralehkých letadel. Každý let sestával z deseti po sobě jdoucích standardních letištních okruhů, aby byly získány údaje z opakovaných vzletů, stoupání, letů po okruhu, přiblížení a přistání, a to za mírně se měnících atmosférických podmínek během trvání letu. První kontrolní let proběhl dne 11. dubna 2025 s továrním letounem Tecnam P92 Echo MK2 registrační značky OK-CUG 23, vybaveným duálním systémem Garmin G3X. Data z palubního systému Garmin byla porovnávána s údaji z pozemní meteorologické stanice GIOM 3000 umístěné přímo na budově věže letiště Sazená. Druhý kontrolní let se uskutečnil 23. dubna 2025 s letounem Bristol Classic NG5 registrační značky OK-EUI 10, rovněž vybaveným systémem Garmin G3X. Data z jeho palubního systému byla porovnávána s údaji z jiné, novější pozemní meteorologické stanice na letišti Sazená, označené ME13, a také s oficiálními meteorologickými zprávami METAR a předpověďmi TAF z nejbližšího letiště s pravidelným meteorologickým pozorováním, Praha Ruzyně LKPR, a v neposlední řadě se subjektivním hodnocením aktuálních podmínek zkušeným pilotem instruktorem, který druhý kontrolní let provedl. Během obou letů byl průběh v kabině i okolí zaznamenáván pomocí 360° akční kamery Insta360 X3 a veškerá relevantní letová data včetně vypočteného vektoru větru byla detailně logována na SD kartu přímo ze systému Garmin G3X s vysokou frekvencí. Získaná data o rychlosti a směru větru z palubních systémů i z pozemních stanic byla následně pečlivě zpracována, časově synchronizována, vizualizována do podoby časových grafů a grafů korelace a systematicky porovnána s cílem objektivně posoudit míru shody, případné systematické či náhodné odchylky a celkovou korelaci mezi jednotlivými zdroji informací v různých fázích letu.

3. Výsledky

Výzkum přinesl řadu konkrétních a detailních výsledků jak z teoretického bádání, tak především z analýzy dat a experimentálního ověření. Teoretická část poskytla ucelený a podrobný přehled problematiky vlivu větru na létání s ultralehkými letadly. Byla popsána nejen fyzikální podstata větru a jeho vznik, ale i klíčové parametry jako rychlost udávaná v různých jednotkách m/s, km/h, kt a její kvalitativní popis pomocí Beaufortovy stupnice, a směr udávaný ve stupních odkud vítr vane. Byl vysvětlen a ilustrován významný vliv čelního větru na zkrácení rozjezdu a dojezdu, zadního větru na jejich prodloužení a zejména komplexní vliv bočního větru na stabilitu a ovladatelnost při vzletu a přistání, včetně detailního popisu nezbytných korekcí pomocí křidélek a směrovky a pilotních technik jako je vzlet/přistání na vyšší rychlosti, použití skluzové metody během výdrže a přechod na kurzovou metodu po odpoutání nebo před podrovnáním pro kompenzaci snosu. Byly také rozebrány nebezpečné jevy jako mechanická turbulence vznikající třením o terén a překážky, termická turbulence způsobená nerovnoměrným ohřevem povrchu, turbulence v úplavu za jiným letadlem a nebezpečný stříh větru, tedy náhlá změna jeho rychlosti nebo směru v horizontálním či vertikálním směru. Dále byly detailně popsány dostupné metody monitorování větru: vizuální pomocí ukazatele směru větru jehož konstrukce, rozměry minimálně 3,6 m délka, 0,9 m vstupní průměr, 0,3 m výstupní průměr a barvy oranžová/bílá nebo červená/bílá jsou standardizovány předpisem L 14; získávání informací z kódovaných meteorologických zpráv METAR aktuální stav a SPECI mimořádná změna, předpovědi TAF krátký na 9h, dlouhý na 18-30h a výstrah SIGMET; a využívání informačních služeb jako je automatický ATIS na velkých letištích, letové provozní služby poskytované ŘLP/LPS včetně služby řízení ATC, letové informační služby FIS a pohotovostní služby, a specifické služby AFIS a RADIO poskytované na neřízených letištích, které předávají informace o provozu a aktuálních podmínkách včetně větru. V neposlední řadě byla vysvětlena funkce klíčových palubních systémů relevantních pro měření: Pitot-statického systému využívajícího rozdíl celkového a statického tlaku a jeho potenciální chyby při zablokování Pitotovy trubice indikace rychlosti se chová jako výškoměr nebo statických portů zamrznutí výškoměru a variometru, rychloměru rozlišujícího indikovanou rychlost IAS, kalibrovanou CAS po korekci přístrojové a polohové chyby, ekvivalentní EAS po korekci na stlačitelnost vzduchu a pravou vzdušnou rychlost TAS po korekci na hustotu vzduchu, dále traťovou rychlost GS jako TAS korigovanou o vítr a Machovo číslo jako poměr TAS k rychlosti zvuku; výškoměru fungujícího na principu aneroidní krabičky a jeho závislosti na správném nastavení barometrického tlaku QNH; variometru; GPS a GNSS systémů pro určení polohy a času a augmentačních systémů DGPS, WAAS, EGNOS pro zvýšení přesnosti; a moderních systémů ADAHRS kombinujících Air Data Computer ADC počítající výšku, rychlosti a teplotu z tlakových senzorů a Attitude and Heading Reference System AHRS využívající MEMS senzory gyroskopy, akcelerometry a magnetometry k určení polohy a orientace letadla v prostoru.

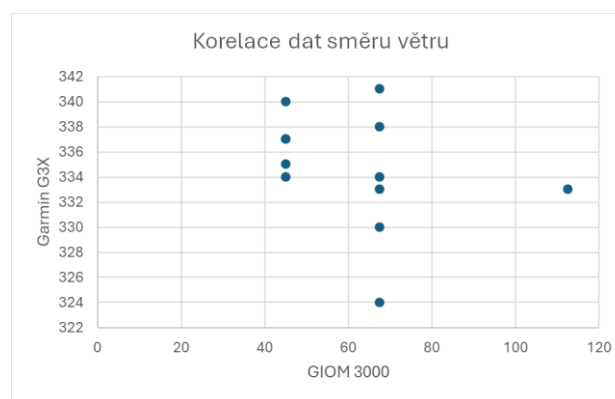
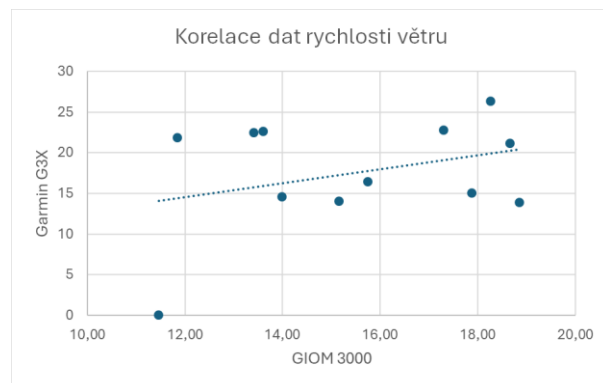
Analýza leteckých nehod a incidentů ultralehkých letadel a letadel GA za období 2019 až 2023 poskytla důležitá kvantitativní data. V České republice bylo v tomto pětiletém období zaznamenáno 17 událostí ultralehkých letadel, s nejvyšším počtem 5 událostí v roce 2020 a nejnižším 2 události

v roce 2021. Jako nejčastější primární příčina těchto událostí byla identifikována nesprávná technika pilotáže, která byla určena jako příčina v 8 případech, tedy téměř v polovině. Dalšími významnými příčinami byly podcenění meteorologických podmínek 3 případy, nedodržení předepsaných postupů 3 případy a neodhalená technická závada také 3 případy. Zásadním zjištěním analýzy byl však explicitně potvrzený významný negativní vliv povětrnostních podmínek, zejména větru, na průběh nebo vznik těchto událostí. U ultralehkých letadel v ČR mělo počasí negativní vliv na 7 ze 17 událostí, což odpovídá statisticky významnému podílu 41 %. Pro srovnání, u letadel všeobecného letectví v ČR byl tento podíl nižší, konkrétně 31 % tj. 15 z 49 událostí. Na Slovensku byla situace odlišná, s pouze jednou událostí ultralehkého letadla za celé období, která navíc nebyla ovlivněna větrem. U GA letadel na Slovensku však došlo k 19 událostem a počasí zde hrálo negativní roli přibližně u 53 % z nich. Detailní rozbor tří vybraných nehod ultralehkých letadel dále ilustrovaly komplexní souhrn faktorů. Nehoda OK-KUU 81 pád TL2000 Sting po ztrátě kontroly při letu na malé rychlosti byla primárně způsobena chybou pilota, ale silný vítr a oblačnost ztěžující orientaci byly označeny jako přispívající faktory. Nehoda OM-M919 pád MH-46 Eclipse po vysazení motoru po vzletu byla způsobena technickou závadou přepnutí motoru, ale jako spolupůsobící příčina byl identifikován vzlet se zadní složkou větru a pravděpodobně nesprávné nastavení klapky. Nehoda OM-M505 poškození Viper SD4 při odskocích během přistání byla způsobena nesprávnou technikou pilotáže, ale odehrála se za podmínek silného bočního větru s poryvy, jehož boční složka dosahovala téměř 90 % limitu letadla, což situaci výrazně zkomplikovalo. Tyto případy potvrdily, že i když vítr nemusí být hlavní příčinou, jeho zvládnutí je pro piloty ultralehkých letadel kritické a nedostatek informací o něm může vést k nehodě.

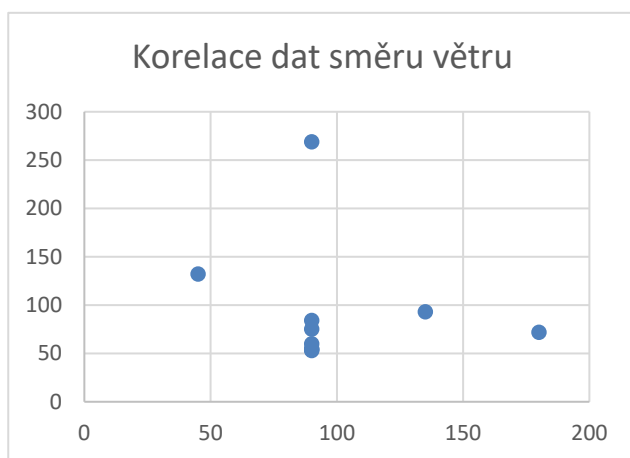
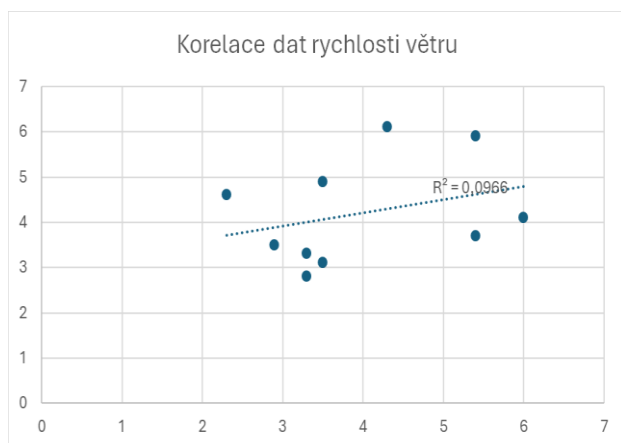
Vyhodnocení navržených řešení pomocí vícekritériální analýzy s předem definovanými váhami kritérií jednoznačně ukázalo jako nejperspektivnější variantu pro zlepšení informovanosti pilotů o větru a tím i bezpečnosti instalaci palubních přístrojů EFIS s možností indikace větru. Toto řešení získalo nejvyšší celkové vážené hodnocení 4,1 bodu. Jeho hlavními přednostmi byla nejvyšší možná známka 5 bodů v klíčových kritériích: dosah a pokrytí informace jsou dostupné kdykoliv a kdekoli během letu, aktuálnost a četnost dat data jsou dostupná v reálném čase s vysokou frekvencí a přesnost informací moderní systémy poskytují přesný vektor větru včetně jeho grafické interpretace. Na druhém místě se umístila služba RADIO s 3,1 bodu, která sice poskytuje relevantní informace, ale je omezena na okolí letiště, závislá na dostupnosti personálu a informace nejsou kontinuální. Nejméně bodů 2,4 získaly dodatečné ukazatele směru větru, které poskytují pouze základní vizuální informaci o směru a hrubý odhad rychlosti, jsou statické a jejich viditelnost může být omezena. Ačkoliv palubní přístroje EFIS představují nejvyšší počáteční investici hodnocení 2 body v kritériu nákladů a vyžadují odbornou instalaci a schválení regulačními orgány hodnocení 2 body v regulační náročnosti, jejich celkový přínos z hlediska kvality, dostupnosti a přesnosti poskytovaných informací o větru byl vyhodnocen jako jednoznačně nejvyšší a nejlépe naplňující cíl zvýšení bezpečnosti.

Výsledky experimentálního ověření pomocí dvou kontrolních letů byly smíšené, ale poskytly cenné prvotní poznatky o reálné

funkčnosti a přesnosti palubního měření větru pomocí systému Garmin G3X.



První kontrolní let, využívající letoun Tecnam P92 Echo MK2 OK-CUG 23 a data z pozemní stanice GIOM 3000, přinesl převážně neuspokojivé výsledky. Hlavním problémem byla extrémně nízká frekvence odesílání dat ze stanice GIOM 3000, více než 4 minuty mezi záznamy, což znemožnilo smysluplné porovnání s dynamicky se měnícími údaji z palubního systému. Mezi dostupnými daty z GIOM 3000 a daty z Garmin G3X nebyla zjištěna prakticky žádná statisticky významná korelace. Údaje GIOM 3000 navíc výrazně neodpovídaly ani oficiální zprávě METAR z LKPR, ani subjektivnímu pozorování pilota během letu. Data z Garminu G3X během tohoto letu sice byla kontinuální, ale vykazovala určité systematické odchylky, například opakující se špičky hodnot rychlosti a směru větru zaznamenané během druhé okružové zatáčky a nulové nebo nesmyslné hodnoty těsně nad zemí při přistání. Tyto jevy byly přičteny komplexnímu vlivu manévru letadla náklon, změna kurzu na senzory ADAHRS a GPS a také limitům algoritmu pro výpočet větru v nízkých výškách a rychlostech, kde může být přesnost ovlivněna například přízemní turbulencí nebo stoupavými proudy.



Druhý kontrolní let, provedený s letounem Bristell Classic NG5 OK-EUI 10 a porovnávající data z Garmin G3X s novější pozemní stanicí ME13 a dalšími referenčními zdroji, přinesl podstatně povzbudivější výsledky. Stanice ME13 poskytovala data v mnohem kratších intervalech, což umožnilo lepší porovnání. Analýza ukázala stále jen slabou korelaci mezi měřením rychlosti větru z palubního systému Garmin a pozemní stanice ME13 během finálních přiblížení. Avšak u klíčového parametru, směru větru, byla pozorována výrazně lepší shoda a silnější statistická korelace mezi oběma systémy, přičemž časové průběhy měřeného směru větru se v mnoha případech dobře shodovaly. Velmi důležité bylo zjištění, že údaje o směru větru z palubního systému Garmin G3X v průběhu druhého letu lépe odpovídaly jak subjektivnímu hodnocení zkušeného pilota instruktora, který let prováděl, tak i oficiální meteorologické zprávě METAR z nedalekého letiště LKPR, než údaje z pozemní stanice ME13. Data z Garminu G3X i během druhého letu vykazovala určité výkyvy, zejména náhlá maxima indikovaného směru větru během první zatáčky každého okruhu, což bylo opět přičteno dynamice letu a principu výpočtu větru přístrojem. Celkově tedy závěry z experimentální části naznačily, že moderní palubní systémy jako Garmin G3X mají reálný potenciál poskytovat pilotům ultralehkých letadel užitečné, i když možná ne dokonale přesné, informace o aktuálním větru, zejména o jeho směru. Zároveň ale výsledky ukázaly, že pro definitivní potvrzení jejich přesnosti, spolehlivosti a limitů, obzvláště v náročnějších meteorologických podmínkách jako jsou silné turbulence nebo stříh větru, je naprosto nezbytné provést další, mnohem

rozsáhlejší a systematictější výzkum. Ten by měl zahrnovat výrazně větší počet kontrolních letů, širší spektrum běžně používaných typů ultralehkých letadel s různě umístěnými senzory, lety na různých letištích s odlišným okolním terénem a vybavených přesnými, kalibrovanými pozemními meteorologickými stanicemi s vysokou vzorkovací frekvencí.

4. Závěr

Tento článek se komplexně zabýval problematikou měření parametrů větru na palubě ultralehkých letadel s cílem přispět ke zvýšení bezpečnosti jejich provozu. Provedená analýza leteckých nehod a incidentů v České republice a na Slovensku za období 2019 až 2023 jasně potvrdila, že vítr je významným faktorem, který negativně ovlivňuje bezpečnost letů v kategorii ultralehkých letadel, neboť přispěl ke vzniku 41 % analyzovaných událostí v ČR. Ačkoliv jako nejčastější primární příčina byla identifikována nesprávná technika pilotáže, lze důvodně předpokládat, že tato selhání často souvisejí s nedostatečnou schopností pilotů adekvátně reagovat na aktuální větrné podmínky z důvodu nedostatku přesných a včasných informací.

Na základě těchto zjištění a podrobné teoretické rešerše byla navržena a systematicky porovnána tři potenciální řešení. Výsledky vícekritériální analýzy jednoznačně ukázaly, že nejperspektivnější variantou je instalace moderních palubních elektronických letových přístrojových systémů EFIS s integrovanou funkcí výpočtu a indikace složky větru. Navzdory vyšším pořizovacím nákladům a nutnosti schválení instalace toto řešení nabízí pilotovi nejpřesnější a nejaktuálnější informace o vektoru větru přímo v kokpitu, a to nepřetržitě během celého letu a nezávisle na externí infrastruktuře.

Experimentální ověření funkčnosti a předběžné posouzení přesnosti pomocí dvou kontrolních letů na letišti Sazená s využitím systémů Garmin G3X poskytlo smíšené, avšak cenné výsledky. Zatímco první let poukázal na problémy se spolehlivostí a nedostatečnou frekvencí dat z použité pozemní stanice, druhý let naznačil výrazně lepší shodu mezi palubním měřením a referenčními daty, zejména pokud jde o směr větru. Údaje z palubního systému Garmin G3X ve druhém letu lépe korelovaly s pozorováním zkušeného pilota a oficiálními meteorologickými zprávami než údaje z pozemní stanice. Tyto výsledky potvrzují potenciál moderních palubních systémů pro monitorování větru. Je však naprosto nezbytné zdůraznit, že vzhledem k omezenému rozsahu provedeného experimentu nelze vyvozovat definitivní závěry. Pro spolehlivé potvrzení přesnosti a spolehlivosti palubního měření větru za různých provozních a meteorologických podmínek, včetně turbulencí a stříhu větru, je nutné provést podstatně rozsáhlejší sérii měření a testů.

Celkově lze konstatovat, že přínos tohoto článku spočívá v komplexním sumarizování a detailním rozboru dosud roztržštěných informací o vlivu větru a možnostech jeho monitorování v kontextu létání s ultralehkými letadly. Kvantifikace vlivu větru na letecké události poskytla silný argument pro potřebu řešení této problematiky. Článek detailně rozpracoval danou problematiku nad rámec běžně dostupných zdrojů a tvoří solidní teoretický i metodologický základ pro navazující práce nebo další výzkum. Především však potvrdil vysoký potenciál navrhovaného řešení – přesného palubního měření větru – pro zásadní zvýšení situačního povědomí a tím i

bezpečnosti pilotů ultralehkých letadel. Zpětná projekce potenciálu tohoto řešení do scénářů analyzovaných nehod naznačuje, že s přesnými informacemi o aktuálním větru by piloti v mnoha případech mohli reagovat adekvátněji, lépe se s vlivem větru vypořádat a potenciálně předejít nehodě nebo alespoň snížit její závažnost. Úspěšné zavedení spolehlivého a přesného palubního měření větru do praxe by mohlo výrazně přispět ke snížení počtu leteckých nehod a incidentů a tím ke zvýšení celkové bezpečnosti létání ultralehkými letadly.

Reference

- AEROWEB.CZ. Umění přistávání s bočním větrem [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/928-umeni-pristavani-s-bocnim-vetrem>.
- AirGuru.cz. Co měří rychloměr. In: AirGuru.cz | Letecké vzdělávání. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.airguru.cz/clanky/rychlomer>.
- Boldmethod. How Does An Altimeter Work?. In: Boldmethod. [online]. 2024-05-07. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/systems/how-does-an-aircraft-altimeter-work-in-flight/>.
- Civil Aviation Authority of New Zealand. Wake Turbulence. [online]. 2008. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/660.pdf>.
- Česká meteorologická společnost ČMeS. Anemometr. In: Elektronický slovník meteorologických pojmů. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.google.com/search?q=http://slovník.cmes.cz/fulltext/anemometr>.
- Česká meteorologická společnost ČMeS. Rychlost větru. In: Elektronický slovník meteorologických pojmů. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.google.com/search?q=http://slovník.cmes.cz/fulltext/rychlost%2520v%25C4%259Btru>.
- Česká meteorologická společnost ČMeS. Směr větru. In: Elektronický slovník meteorologických pojmů. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.google.com/search?q=http://slovník.cmes.cz/fulltext/sm%25C4%259Br%2520v%25C4%259Btu>.
- Česká meteorologická společnost ČMeS. Turbulence mechanická. In: Elektronický slovník meteorologických pojmů. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/4114>.
- Česká meteorologická společnost ČMeS. Turbulence termická. In: Elektronický slovník meteorologických pojmů. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/4118>.
- DANEY, Jean; LESCEU, Xavier. Wind shear: an invisible enemy to pilots?. In: Safety First. [online]. 2015. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: [https://safetyfirst.airbus.com/wind-](https://safetyfirst.airbus.com/wind-shear-an-invisible-enemy-to-pilots/)

[shear-an-invisible-enemy-to-pilots/](https://www.faa.gov/sites/aaasafety/files/gslac/library/documents/2011/aug/56407/aa%20p-8740-40%20windshear%5Bhi-res%5D%20branded.pdf). [15] Federal Aviation Administration FAA. Windshear. Report No.: P-8740-40. [online]. 2011. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.faa.gov/sites/aaasafety/files/gslac/library/documents/2011/aug/56407/aa%20p-8740-40%20windshear%5Bhi-res%5D%20branded.pdf>.

- Federal Aviation Administration FAA. Kapitola 8. In: Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge PHAK. Vydání 2010. [online]. 2010. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.faa.gov/sites/aaasafety/files/gslac/library/documents/2011/aug/56407/aa%20p-8740-40%20windshear%5Bhi-res%5D%20branded.pdf>.
- Flying Revue. Vítr za letu? Nevadí. Při startu a přistání je to ale mocný soupeř. [online]. Praha: Flying Revue, 1. 2. 2017 [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=https://www.flying-revue.cz/chytre-letani-8i%3Futm_source.
- GLAZER, Neil. Aircraft Vertical Speed Indicator VSI: How Does it Work?. In: Pilot Mall. [online]. 2023-08-17. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.pilotmall.com/blogs/news/aircraft-vertical-speed-indicator-vsi-how-does-it-work>.
- GLAZER, Neil. Pitot-Static System: How does it work?. In: PilotMall.com. [online]. 2023-08-17. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.pilotmall.com/blogs/news/pitot-static-system-how-does-it-work>.
- HABRNAL, Lukáš. Dekódování METAR a TAF. In: AirGuru.cz | Letecké vzdělávání. [online]. 2023-04-18. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.airguru.cz/clanky/metar>.
- IVAO. SIGMET explanation. In: IVAO Documentation Library. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: https://wiki.iviao.aero/en/home/training/documentation/SIGMET_explanation.
- Letecká amatérská asociace České republiky LAA ČR. Plochy pro vzlety a přistání sportovních létajících zařízení. LA 3. [online]. 2008-08-28. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.laacr.cz/predpisy/la-3/>.
- Letecká amatérská asociace České republiky LAA ČR. Požadavky letové způsobilosti SLZ Ultralehké letouny řízené aerodynamicky. UL 2 – Část I. [online]. 2019-03-26. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.laacr.cz/predpisy/ul-2-cast-i/>.
- meteogram.cz. Beaufortova stupnice rychlosti větru. In: meteogram.cz. [online]. 2021-04-26. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.meteogram.cz/beaufortova-stupnice-rychlosti-vetru/>.
- MOYANO CANO, J. Quadrotor UAV for wind profile characterization. Master's thesis, Universidad Carlos III de Madrid, Campus de Leganés, Avda. de la Universidad, 30 28911 Leganés, Spain, 2013. Dostupné z: <https://e->

- archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/623df335-db97-49b1-931b-3dddb6d89ecf/content.
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. GPS Overview. In: GPS.gov. [online]. 2021-02-22. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/>.
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. Space Segment. In: GPS.gov. [online]. 2022-06-28. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>.
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. Control Segment. In: GPS.gov. [online]. 2021-08-09. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>.
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. Applications. In: GPS.gov. [online]. 2014-11-25. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/applications/>.
- National Weather Service. Origin of Wind. In: JetStream – Online School for Weather. [online]. 9. listopadu 2023. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.noaa.gov/jetstream/synoptic/origin-of-wind>.
- National Weather Service. Turbulence. In: weather.gov. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/turbulence_stuff/turbulence/turbulence.htm.
- ORLITA, Michal. METAR a TAF - jak je využít i pro VFR létání?. In: Orlita.net. [online]. 2024-11. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.orlita.net/metar/>.
- Pilot Institute. The Pitot-Static System: How It Works. In: Pilot Institute. [online]. 2024-12-24. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://pilotinstitute.com/pitot-static-system/>.
- Řízení letového provozu České republiky, s.p. ŘLP ČR, s.p.. Letové provozní služby. L 11. DODATEK N – LETIŠTNÍ LETOVÁ INFORMAČNÍ SLUŽBA AFIS. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-11/data/effective/dodN.pdf>.
- Řízení letového provozu České republiky, s.p. ŘLP ČR, s.p.. Letové provozní služby. L 11. DODATEK S – POSKYTOVÁNÍ INFORMACÍ ZNÁMÉMU PROVOZU NA LETIŠTÍCH, KDE NEJSOU POSKYTOVÁNY ATS. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-11/data/effective/dodS.pdf>.
- Řízení letového provozu České republiky. Letiště. L 14. Změna 11/ČR. [online]. 2025-04-17. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/index.htm>.
- Řízení letového provozu ČR, s.p. ŘLP ČR, s.p.. Letové provozní služby. In: VFR příručka – Česká republika. GEN 6. [online]. 2025-04-03. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/vfrmanual/actual/gen_6_cz.html.
- SKYbrary. Meteorological Aerodrome Report METAR. In: SKYbrary Aviation Safety. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/meteorological-aerodrome-report-metar>.
- SKYbrary. Turbulence. In: SKYbrary Aviation Safety. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/turbulence>.
- Stratos Jets. Automatic Terminal Information Service ATIS. In: Stratos Jets. [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.stratosjets.com/glossary/automatic-terminal-information-service-atis/>.
- The Recreational Aircraft Association. Altimeter Tune Up. [online]. 2017. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: https://www.raa.ca/magazine_pdf/tech%20articles/Altimeter%20Tune-up.pdf.
- Umweltanalysen.com. GPS - an Introduction to Global Positioning System. User segment. [online]. 2025. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=https://www.umweltanalysen.com/en/gps/%23User_segment.
- ÚSTAV PRO ODBORNÉ ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN LETECKÝCH NEHOD ÚZPLN. ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA o odborném zjišťování příčin letecké nehody ultralehkého letounu TL2000 STING poznávací značky OK-KUU 81 u obce Vlčkovice v Podkrkonoší ze dne 24. října 2022. Sp. zn. CZ-22-1204. [online]. 2025. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.google.com/search?q=https://uzpln.cz/pdf/202501281226-ZZ%2520CZ-22-1204%2520-%2520final%2520web.pdf>.
- ÚSTAV PRO ODBORNÉ ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN LETECKÝCH NEHOD ÚZPLN. ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA o odborném zjišťování příčin letecké nehody UL letounu MH-46 Eclipse poznávací značky OM-M919 0,8 km severně LKFR dne 29. 7. 2021. [online]. 2022. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://uzpln.cz/pdf/20220520110711.pdf>.
- ÚSTAV PRO ODBORNÉ ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN LETECKÝCH NEHOD ÚZPLN. ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA o odborném zjišťování příčin letecké nehody letadla VIPER SD4, poznávací značky OM-M505, dne 8. 5. 2019 na LKPO. [online]. 2019. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://uzpln.cz/pdf/20191003090636.pdf>.
- VectorNav. Inertial Navigation Primer. Attitude & Heading Reference System AHRS. 1.6. [online]. 2025. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/theory-of-operation/theory-ahrs>.



NÁVRH NA ZLEPŠENÍ PLÁNU STRATEGICKÉHO ROZVOJE LETIŠTĚ OSTRAVA

Alexandr Kapitanov
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Benedikt Badánik
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

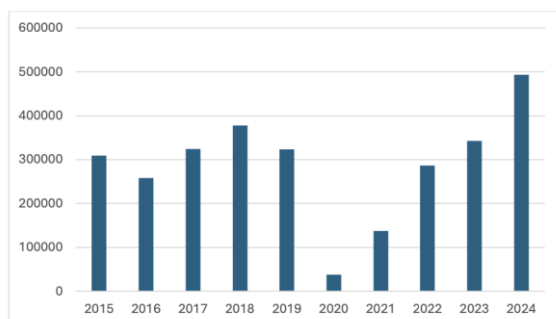
Airports are not only essential transport hubs, but also dynamic centres of economic growth, technological progress and global connectivity. While major international airports dominate global air transport, regional airports play an increasingly important role in the development of individual regions, connecting local economies with foreign markets and contributing to the diversification of air transport. This diploma thesis focuses on the strategic development of the regional Leoš Janáček Ostrava Airport. The main objective is to evaluate its current status in the aviation industry, explore its potential and propose an improved strategic development plan. This should lead to increased capacity, improved airport performance and its long-term sustainability and competitiveness. The theoretical part of the thesis discusses aspects of strategic airport management, including economic, infrastructural and technological factors that influence the operation and development of the airport. The first part of the thesis focuses on a detailed analysis of the position of Leoš Janáček Ostrava Airport within the Czech and Central European aviation market. Using methods such as benchmarking and different types of analysis, the current performance of the airport is evaluated and opportunities for its further development are identified. Based on these findings, strategic development goals are proposed, the aim of which is to achieve maximum use of the airport's potential. The results of this work can serve not only as a strategic plan for Ostrava Airport, but also as a reference model for other regional airports in the Czech Republic, which strive to strengthen their market position and long-term growth in the dynamically changing aviation industry.

Keywords

Regional airport development, Strategic planning, Performance analysis, Sustainable growth, Airport competitiveness

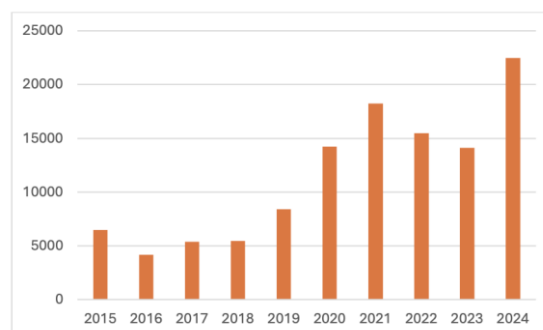
1. Úvod

Letiště Leoše Janáčka Ostrava je regionálním letištěm nacházejícím se v srdci Moravskoslezského kraje. Jeho strategická poloha v bezprostřední blízkosti významných průmyslových a logistických zón, stejně jako napojení na hlavní dopravní tepny včetně dálnice D1 a železniční sítě, mu poskytují konkurenční výhodu v rámci České republiky i širšího středoevropského prostoru. Letiště disponuje moderní infrastrukturou, včetně vzletové a přistávací dráhy o délce 3500 metrů, která umožňuje odbavovat široké spektrum letadel, včetně největších typů v civilním provozu. Přestože letiště disponuje kapacitou na odbavení více než milionu cestujících ročně, jeho reálné využití je zatím podstatně nižší. V oblasti osobní přepravy zaostává letiště za svými možnostmi i za některými srovnatelnými regionálními letišti v České republice.



Graf 1 Vývoj v počtu odbavených cestujících na letišti v Ostravě

V oblasti nákladní dopravy si naopak buduje stále pevnější pozici, přičemž se stává jedním z hlavních center cargo dopravy v zemi.



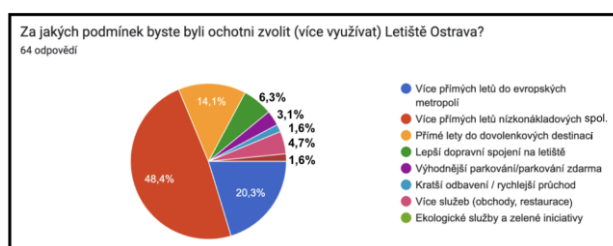
Graf 2 Vývoj v počtu odbavených tun nákladu na letišti v Ostravě

Úspěšný rozvoj letiště je zásadní nejen pro zvýšení jeho vlastní konkurenceschopnosti, ale také pro širší rozvoj Moravskoslezského regionu, který je významným průmyslovým centrem s vysokým potenciálem pro rozvoj mezinárodního obchodu a logistiky. Vzhledem k těmto faktorům je nezbytné analyzovat současnou situaci, identifikovat hlavní problémy a příležitosti a na základě toho formulovat efektivní plán strategického rozvoje, který by odpovídal aktuálním trendům v letectví a specifickým potřebám regionu. Tato práce si klade za cíl nejen analyzovat dosavadní vývoj a aktuální stav Letiště Ostrava, ale především nabídnout konkrétní návrhy na jeho budoucí směřování. Vzhledem k neustálému pokroku v oblasti letectví a změnám v cestovatelském chování cestujících i podniků je nezbytné, aby letiště dokázalo flexibilně reagovat na nové výzvy a efektivně využívat příležitosti, které se nabízejí. Strategický rozvoj letiště musí být v souladu se snahou o vyšší

ekonomickou výkonnost, udržitelnost provozu a posílení jeho postavení v rámci mezinárodní letecké dopravy.

2. Metodika a metody zkoumání

Pro vypracování komplexního návrhu na zlepšení plánu strategického rozvoje Letiště Ostrava byla použita kombinace několika výzkumných metod, které umožnily pokrýt jak kvantitativní, tak kvalitativní aspekty analyzovaného problému. Hlavním cílem bylo získat co nejucelenější obraz o vnitřním stavu letiště i o jeho postavení na trhu, a to nejen v rámci České republiky, ale i v mezinárodním kontextu. Jedním ze základních pilířů metodiky byla SWOT analýza, která slouží k identifikaci silných a slabých stránek letiště, stejně jako příležitostí a hrozeb plynoucích z jeho vnějšího prostředí. Tato metoda umožňuje systematický přístup k podstatným provozním i externím faktorům ovlivňujícím rozvoj letiště. Další využitou metodou byla PESTEL analýza, která se zaměřila na hodnocení širších makroekonomických, politických, sociálních, technologických, environmentálních a legislativních faktorů. Pro zhodnocení konkurenčního prostředí byla použita Porterova analýza pěti konkurenčních sil, která poskytla vhled do dynamiky trhu, intenzity konkurence a vyjednávací síly dodavatelů a odběratelů. Významnou součástí výzkumu bylo rovněž benchmarkingové srovnání Letiště Ostrava s jinými regionálními letišti, především s Letištěm Brno-Tuřany a Letištěm Pardubice, což umožnilo identifikovat oblasti, kde má ostravské letiště rezervy, a naopak, ve kterých je napřed. Další část výzkumu byla založena na dotazníkovém šetření mezi cestujícími, kde byly zjišťovány jejich zkušenosti, očekávání a hodnocení poskytovaných služeb. Dotazník obsahoval otázky zaměřené na frekvenci využívání letiště, preferované destinace, hodnocení komfortu a dostupnosti a identifikaci bariér, které brání vyššímu využívání letiště. Kromě dotazníku byli cestující osloveni i osobně, kde došlo k získání 31 odpovědí na základě tří formulovaných otázek pokládaným všem respondentům. Otázky se vztahovali k důvodu výběru letiště, názoru na oblasti k zdokonalení a návrhu nových vytoužených destinací z letiště.



Graf 3 Příkladná otázka z dotazníkového průzkumu týkající se podmínek využívání Letiště Ostrava

Data byla následně statisticky analyzována a byly kvalitativně vyhodnoceny otevřené odpovědi. Výsledky jednotlivých metod byly vzájemně konfrontovány a integrovány s cílem vytvořit komplexní obraz stavu a možností rozvoje Letiště Ostrava.

3. Výsledky

Analýzy ukázaly, že Letiště Leoše Janáčka Ostrava disponuje významnými přednostmi, které mohou tvořit základ jeho budoucího rozvoje. Mezi hlavní silné stránky patří nejen technické parametry letiště, jako je délka a kapacita vzletové a

přistávací dráhy, moderní terminál a kvalitní zázemí pro nákladní dopravu, ale i výhodná geografická poloha v blízkosti průmyslově rozvinutého regionu. Letiště je schopné odbavovat jak osobní, tak nákladní lety na vysoké úrovni, přičemž v oblasti cargo dopravy již nyní patří mezi nejvýznamnější centra v České republice. Slabé stránky letiště spočívají především v omezené nabídce pravidelných osobních leteckých spojení, která je ve srovnání s konkurenčními letišti nedostatečná. Tento stav je důsledkem jednak slabé marketingové propagace, jednak ne zcela efektivní komunikace s leteckými dopravci. Významnou slabinou je také relativně nízká úroveň veřejné dopravy zajišťující spojení letiště s centrem Ostravy a dalšími městy regionu, což snižuje atraktivitu letiště zejména pro méně mobilní cestující. SWOT analýza dále ukázala, že hlavní příležitosti pro rozvoj letiště spočívají v navázání nových linek do hlavních evropských uzlů, rozvoji nízkokvadrových spojení a větším využití rostoucí poptávky po cargodopravě, zejména v oblasti e-commerce. Důležitou příležitostí je také potenciál partnerství s okolními průmyslovými zónami a logistickými parky, které by mohly generovat stabilní nákladní provoz. Hrozby představují především rostoucí konkurence ze strany letišť v Polsku a na Slovensku, možné ekonomické recese ovlivňující poptávku po letecké přepravě a regulační změny v oblasti environmentální politiky. Dotazníkové šetření mezi cestujícími potvrdilo, že hlavními faktory ovlivňujícími volbu letiště jsou dostupnost přímých spojů, cena letenek, kvalita služeb a dostupnost letiště z místa bydliště. Velká část respondentů uvedla, že by Letiště Ostrava využívala častěji, pokud by nabízelo širší síť pravidelných spojení a lepší napojení na hromadnou dopravu. Výsledky ukazují, že existuje značný potenciál pro růst osobní přepravy za předpokladu implementace cílených rozvojových opatření.

Na základě výše zmíněných analýz a šetření byly formulovány návrhy jednotlivých strategických cílů.

1. Rozšíření sítě pravidelných leteckých spojení

Zvýšení počtu destinací by mělo přivést více cestujících a posílit konkurenceschopnost letiště.

2. Zlepšení veřejné dopravní dostupnosti letiště

Lepší napojení na městskou a regionální dopravu zvyšuje komfort a dostupnost pro cestující.

3. Zavedení incentivního systému pro přilákání nových dopravců

Dynamické nastavení poplatků případně sdílený marketing či počáteční finanční podpora linek může přilákat nové dopravce.

4. Posílení marketingových a komunikačních aktivit

Cílená propagace pomůže zvýšit povědomí o letišti mezi cestujícími i leteckými společnostmi. Součástí je také neustálá analýza konkurenčních letišť na jejíž základě bude vylepšováno zákaznické prostředí na letišti v Ostravě.

5. Vylepšení zákaznického zážitku

Zavedení digitálních služeb a podpora současných služeb a obchodů na letišti zvýší spokojenost cestujících a zanechá lepší dojem na využití letiště.

6. Budování značky „Ostrava Gateway“

Silná značka zvýší atraktivitu letiště a jeho roli jako vstupního bodu do regionu.

7. Rozvoj nákladní dopravy

Zvýšení objemu cargo dopravy využije rostoucí poptávku v oblasti e-commerce.

8. Podpora nízkonákladových dopravců

Spolupráce s low-cost aerolinkami umožní rozšíření sítě destinací za výhodné ceny, které jsou mezi cestujícími velmi žádané.

9. Diverzifikace provozu na letišti

Zlepšení zázemí pro menší letadla přiláká nové zákazníky z oblasti byznys letectví.

10. Prohloubení spolupráce s regionálními podniky

Vazby na místní firmy mohou zajistit stabilní poptávku a obchodní využití letiště.

11. Zajištění environmentální udržitelnosti provozu

Důraz na ekologická opatření přispívá k odpovědnému a modernímu rozvoji infrastruktury, navíc ušetřené prostředky v této oblasti mohou být investovány do jiných oblastí rozvoje.

Ve srovnání s aktuálním směřováním Letiště Ostrava představují navržené strategické cíle ambicióznější a komplexnější přístup k jeho rozvoji. Zatímco současná strategie se soustředí převážně na udržení provozu v oblasti nákladní dopravy a sezónních charterových letů, návrh diplomové práce klade důraz na systematické posílení konkurenceschopnosti ve všech klíčových oblastech – od rozšíření sítě pravidelných spojení přes vylepšení služeb a zákaznického zážitku, směřování marketingových aktivit až po ekologickou udržitelnost. Zvláštní pozornost je věnována také zlepšení dopravní dostupnosti a budování značky letiště, což jsou oblasti, které dosud nebyly plně využity. Strategické cíle tedy reflektují širší potenciál letiště a ukazují cestu k jeho transformaci z doplňkového uzlu na významného hráče regionální letecké dopravy.

4. Závěr

Na základě provedených analýz lze konstatovat, že Letiště Ostrava má všechny předpoklady stát se silným regionálním hráčem v oblasti letecké dopravy, avšak jeho současné využití zdaleka neodpovídá jeho možnostem. Pro dosažení strategických cílů je nezbytné přijmout opatření zaměřená na zvýšení atraktivity letiště jak pro cestující, tak pro letecké dopravce a logistické firmy. Realizace navržených opatření by měla vést nejen k nárůstu počtu odbavených cestujících a objemu přepraveného nákladu, ale také k celkovému posílení ekonomického významu letiště pro celý region. Letiště Ostrava se tak může stát významným pilířem regionálního rozvoje a důležitým článkem ve středoevropské dopravní síti.

Reference

Kapitanov, A. (2025). *Návrh na zlepšení plánu strategického rozvoje Letiště Ostrava*. Žilinská univerzita v Žilině, Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov, Katedra leteckej dopravy.

Ministerstvo dopravy České republiky. (2024). Statistiky letecké dopravy za rok 2023. Dostupné na: <https://www.mdcr.cz>

Letiště Leoše Janáčka Ostrava. (2024). Výroční zpráva 2023. Dostupné na: <https://www.airport-ostrava.cz>



PREPRAVA NÁKLADU (CARGO) V BATOŽINOVÝCH PRIESTOROCH OSOBNÝCH LIETADIEL

Filip Koreník
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Ján Rostáš
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The main objective of this paper is a comprehensive analysis of the economic and business processes in the case of the introduction of cargo transportation in the cargo compartments of passenger aircraft. The paper focuses on the definition and description of air freight transport, a brief history, types of cargo transported, advantages and disadvantages of air freight transport and the most common business models used in air freight transport. We also analyse the current state of the art in the transportation of cargo in the baggage compartments of passenger aircraft. Subsequently, through the use of research methods, which are data collection and synthesis, literary research, data analysis, PESTLE analysis and also comparison of the resulting data, we have comprehensively analysed the economic aspects in the field of cargo transportation through the use of available cargo hold capacity, thus fulfilling our objective. At the end of the paper, we have tried to suggest possible optimization procedures that could help airlines to increase profit generation.

Keywords

freight transport, belly cargo, baggage compartments of passenger aircraft

1. Úvod

Letecká doprava je dôležitou súčasťou životov ľudí po celom svete. Zároveň je to veľmi dynamické a rýchlo sa rozvíjajúce odvetvie. Jej dôležitou súčasťou je aj preprava nákladu. Preprava nákladu prostredníctvom leteckej dopravy je nevyhnutná najmä pri časovo senzibilnom tovare, akým sú napríklad čerstvé kvety, živočíšne produkty alebo rôzne farmaceutické výrobky, ktoré podliehajú rýchlej skaze. To znamená, že nákladná letecká doprava je jednoznačne najrýchlejší možný spôsob doručenia tovaru po celom svete. V poslednej dobe sa čoraz viac jej neoddeliteľnou súčasťou stáva aj preprava nákladu v batožinových priestoroch osobných lietadiel. Práve aktuálnosť tejto témy nás motivovala k podrobnému preskúmaniu tohto spôsobu prepravy nákladu a zároveň teda k výberu témy tohto článku. Hlavným cieľom je komplexná analýza ekonomických a obchodných procesov v prípade zavedenia prepravy nákladu v cargo priestoroch osobných lietadiel.

Tento článok sa ďalej zameriava na posúdenie ekonomickej relevantnosti a obchodných aktivít z pohľadu leteckých prevádzkovateľov a zároveň aj z pohľadu letísk. Výsledkom článku je analýza údajov, ktoré sa spájajú s prepravou nákladu v batožinových priestoroch osobných lietadiel. Následne je vykonaná aj komparácia výsledkov, ktoré sú získané pomocou zhodnotenia a výpočtu údajov o prevádzke leteckých liniek z letiska v Košiciach. Vzhľadom na malú vzorku (1 letisko) sú výpočty naviazané na letisko v Košiciach, ale ich aplikovateľnosť pri malých úpravách a aproximácii je možné využiť aj pri iných letiskách. Na záver je v článku uvedených niekoľko odporúčaní, na základe výsledkov z analýzy a komparácie údajov, ktoré by mohli prispieť k optimalizácii ekonomických aspektov v oblasti prepravy nákladu v batožinových priestoroch osobných lietadiel zo strany leteckých spoločností a zároveň aj zo strany letiska.

2. Metodika

1. Metodika a metódy skúmania

- Získanie dát z letiska v Košiciach
- Sumarizácia a syntéza získaných údajov (celosvetová prevádzka v oblasti prepravy nákladu v batožinových priestoroch osobných lietadiel, dáta z letiska v Košiciach)
- Analýza získaných dát: výpočet a aproximácia potrebných údajov

2. Teoretické východiská a súčasný stav riešenej problematiky

- Vymedzenie a definícia základných pojmov: letecká preprava nákladu
- História leteckej prepravy nákladu
- Výhody a nevýhody leteckej prepravy nákladu
- Druhy prepravovaného nákladu prostredníctvom leteckej dopravy
- Obchodné modely využívané v leteckej doprave
- Súčasný stav riešenej problematiky: využitie metódy literárnej rešerše

3. Zhodnotenie a výsledky získaných a vypočítaných údajov
- Metóda komparácie - Návrhy optimalizácie ekonomických aspektov v oblasti prepravy nákladu v batožinových priestoroch osobných lietadiel

Tabuľka 1: Postup metodiky

3. Teoretické východiská riešenej problematiky

Pod pojmom letecká nákladná doprava alebo aj letecká preprava nákladu rozumieme všetok prepravený náklad prostredníctvom leteckej dopravy. Do definície nepatrí len preprava pošty a batožín cestujúcich, ktorí využívajú daný let. Pri definovaní leteckej nákladnej prepravy sa môžeme stretnúť s dvoma spôsobmi leteckej nákladnej prepravy. Medzi tieto spôsoby prepravy tovaru prostredníctvom leteckej dopravy patrí: Letecká nákladná preprava (druh prepravy leteckého nákladu (carga), na ktorého prepravu sú využívané len lietadlá, ktoré sú špeciálne upravené a klasifikované ako nákladné lietadlá). Druhým spôsobom je letecká kombinovaná preprava (letecká preprava nákladu (carga) v batožinových priestoroch osobných lietadiel) [1].

V minulom roku (2024) bol zaznamenaný výrazný dvojciferný nárast kapacity leteckej nákladnej dopravy. Kapacita disponibilných priestorov a dostupného plateného zaťaženia v nákladných priestoroch lietadiel sa postupne obnovuje a celková kapacita nákladných lietadiel zostáva nad úrovňou spred pandémie COVID-19 [2].

Podľa údajov spoločnosti Rotare, ktoré boli prevzaté na základe vyjadrenia medzinárodnej organizácie IATA dosiahla celková kapacita leteckej nákladnej dopravy v roku 2024 úroveň 442 miliárd „ATK“ (dostupných tonokilometrov), čo predstavuje medziročný rast približne o 10%. Tento spomínaný nárast bol primárne zapríčinený návratom osobnej leteckej dopravy, keďže kapacita batožinových priestorov v osobných lietadlách vzrástla o takmer 13%, čo taktiež vychádza z údajov poskytnutých medzinárodnou organizáciou IATA. Práve tento trinásťpercentný nárast zabezpečil návrat na úroveň z roku 2019 [3].

Sektor leteckej nákladnej dopravy zaznamenal medziročný nárast kapacity o 8%, keďže v tomto odvetví sú využívané čoraz viac špeciálne lietadlá, čiže lietadlá, ktoré využívajú voľnú kapacitu batožinových priestorov. Tieto špeciálne upravené lietadlá, ktoré naraz prepravujú aj platiacich cestujúcich a rovnako aj náklad, ktorý je uložený v batožinových priestoroch, začali byť vo väčšej miere využívané práve po pandémii COVID-19. Pretože práve počas pandémie bolo množstvo upravených lietadiel, ktoré boli dovtedy využívané výlučne na prepravu cestujúcich. V porovnaní s úrovňou z roku 2019 (pred pandemiou COVID-19) sa kapacita nákladných priestorov lietadiel zvýšila približne o 43% [2].

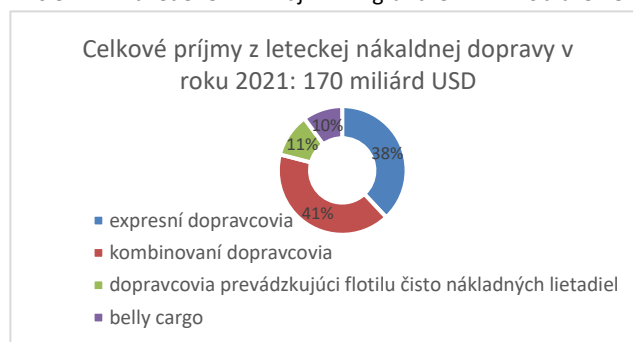
Hoci dostupné tonokilometre vzrástli medziročne o 10%, tak nárast tonáže prepraveného nákladu v tom istom období bol len na úrovni 8%, čo sa dá vysvetliť tým, že väčšina leteckých

spoločností prepravujú náklad na letoch, ktoré sú kategorizované ako „long haul“ (lety na dlhé vzdialenosti). Týmto spôsobom letecké spoločnosti optimalizujú využitie dostupnej kapacity [2].

4. Výsledky

Zaujímavá a možno z časti aj prekvapujúca je informácia z roku 2022 od spoločnosti Boeing, ktorá nám hovorí, že letecká doprava je veľmi dôležitou súčasťou globálnych sietí distribúcie tovaru. Avšak najväčšou zaujímavosťou na tejto informácii je, že nákladná letecká doprava predstavuje menej ako 1% tonáže svetového obchodu, ale zároveň zodpovedá až 35% celkovej hodnoty [4].

Zo správy od spoločnosti Boeing z roku 2022 vyplýva, že celkové príjmy z nákladnej leteckej dopravy na úrovni 170 miliárd amerických dolárov. Z tejto čiastky 10% tvorili práve príjmy z nákladnej dopravy s pomocou využitia modelu „belly cargo,“ ktorému je venovaný aj tento článok. Pre lepšie predstavenie je nižšie uvedené aj grafické zobrazenie.

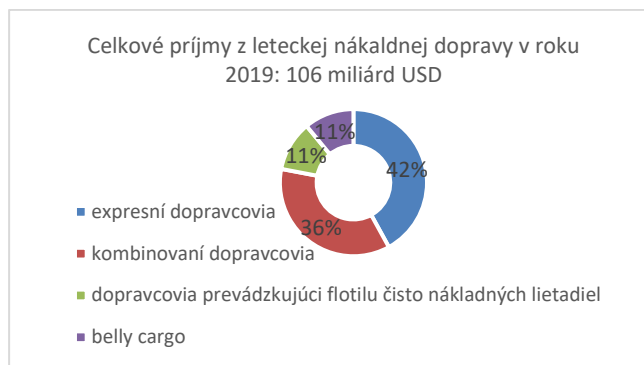


Graf 1: Prehľad príjmov (v miliárdach USD) z leteckej nákladnej dopravy za rok 2021 podľa využívaných typov modelov leteckých dopravcov

V grafe č. 1 môžeme vidieť prehľad príjmov leteckých dopravcov z nákladnej leteckej dopravy v roku 2021. Percentuálne hodnoty v grafe sú rozdelené podľa využívaného obchodného modelu leteckých dopravcov.

Pre porovnanie je nižšie uvedený ďalší graf, ktorý zobrazuje prehľad príjmov leteckých dopravcov na základe využívania typov obchodných modelov nákladnej leteckej dopravy. Tento graf je poskladaný z údajov z obdobia pred pandemiou COVID-19, konkrétne z roku 2019.

Následne nižšie je pre porovnanie zobrazený aj druhý graf. Z grafu č. 2 vyplýva, že v roku 2019 mali najväčší podiel na celkových príjmoch, konkrétne 42%, leteckí dopravcovia, ktorí využívajú model integrovanej leteckej dopravy, čiže zabezpečujú prepravu nákladu tzv. od dverí k dverám. Na prepravu nákladu využívajú lietadlá, ale taktiež aj pozemné dopravné prostriedky (napr. DHL, UPS, FedEx). Ďalej nasledujú s 36% percentami kombinovaní leteckí dopravcovia. A rovnako s podielom 11% sú to „All-Cargo Carriers“ a obchodný model „Belly Cargo“.



Graf 2: Prehľad príjmov (v miliárdach USD) z leteckej nákladnej dopravy za rok 2019 podľa využívaných typov modelov leteckých dopravcov

Príklad, ktorý vo svojej štúdii uviedli Huang a kol. bol opäť príklad spoločnosti Air China, ktorej priemerný percentuálny podiel príjmov generovaných využitím prepravy nákladu prostredníctvom využitia voľných kapacít batožinových priestorov osobných lietadiel sa za posledné tri roky (2021, 2022, 2023) pohyboval na úrovni 53% [5].

Tento príklad je dobrým ukazovateľom toho, že niekedy je správne nastavenie marketingu a taktiež optimalizácia využitia kapacít a celkové využitie flotily danej leteckej spoločnosti dôležitejšie ako samotná prevádzka. Taktiež je na tomto príklade viditeľné to, že niektoré letecké spoločnosti, ako aj v tomto prípade Air China dokážu generovať väčšiu časť svojich ročných príjmov práve prostredníctvom dokladania nákladu alebo teda využitia voľných kapacít batožinových priestorov osobných lietadiel a tak prepravovať pasažierov aj náklad súčasne.

Ďalší príklad je z európskeho trhu leteckej dopravy. Konkrétne sa v tomto prípade jedná o letisko Viedeň Schwechat, kde zaznamenali pozitívny vývoj v preprave nákladu v roku 2024. Konkrétne sa na Viedenskom letisku od januára do septembra v roku 2024 odbavilo celkovo 216 360 ton nákladu. Táto hodnota predstavuje nárast o 20% oproti rovnakému obdobiu minulého roka. Významný podiel na tomto náraste mala aj preprava nákladu v batožinových priestoroch osobných lietadiel. Za prvých deväť mesiacov kalendárneho roka 2024 sa tonáž nákladu prepravená prostredníctvom tohto druhu nákladnej dopravy zvýšila oproti rovnakému obdobiu minulého roka o 45%, čo predstavovalo hodnotu 90 692 ton. K týmto prosperujúcim číslam prispel aj fakt, že z viedenského letiska opäť spustila prevádzku letecká spoločnosť Qatar Airways, ktorá spája svojou linkou letisko Viedeň Schwechat s letiskom v hlavnom meste Kataru (Dauha). A taktiež sa do Viedne vrátil aj čínsky dopravca Hainan Airlines. Julian Jäger. Spoločný generálny riaditeľ a prevádzkový riaditeľ viedenského letiska okomentoval situáciu nasledovne: „Letisko Viedeň Schwechat naďalej rozširuje svoju pozíciu centrálného nákladného uzla. Zvyšujúci sa počet leteckých spoločností, ktoré si nás vybrali ako spoľahlivé miesto pre nákladnú dopravu a najmä 45-percentný

nárast prepravy nákladu v batožinových priestoroch osobných lietadiel je toho dôkazom“ [6] [7].

Ďalším krokom bol podrobný rozbor dát, ktoré hovoria o prevádzke leteckých liniek, ktoré boli prevádzkované na Košickom letisku v období rokov 2022-2024. Dáta sú získané po kontaktovaní manažmentu letiska v Košiciach. Konkrétne sa jedná o údaje, ako letové poriadky z daných rokov, počet pristátí a odletov danej leteckej spoločnosti na / z letiska v Košiciach v danom mesiaci, počet cestujúcich na jednotlivých linkách a taktiež hmotnosť prepraveného nákladu na jednotlivých linkách. Ďalej bola využitá aj hmotnosť cestujúcich, batožiny, prázdne hmotnosti lietadiel a taktiež MTOW lietadiel, ktoré boli využívané na prevádzku daných liniek. Z dôvodu, že tieto údaje neboli dostupné v poskytnutých dátach, tak sú potrebné dáta získané z aktuálnych dostupných dát leteckých spoločností a taktiež z usmernenia od agentúry EASA. Po dôkladnej analýze, výpočtoch a komparácii dát je na základe výsledkov v ďalšej časti článku uvedených niekoľko návrhov na optimalizáciu ekonomických aspektov prepravy nákladu v batožinových priestoroch osobných lietadiel.

Jeden prípad, konkrétne rozbor dát leteckej spoločnosti Austrian Airlines na linke Košice – Viedeň je uvedený pre príklad aj v tomto článku. Táto linka je prevádzkovaná leteckou spoločnosťou Austrian Airlines vo frekvenciách 1 až 2-krát za deň. Na prevádzku letecká spoločnosť Austrian Airlines využíva lietadlo typu Embraer 195. Tieto špecifikácie sú zistené z údajov poskytnutých košickým letiskom. Konkrétne sa tieto údaje nachádzajú v poskytnutých letových poriadkoch. Embraer 195 v konfigurácii spoločnosti Austrian Airlines ponúka sedadlovú kapacitu na úrovni 120 miest. Maximálna vzletová hmotnosť je 50 800 kg, maximálna povolená hmotnosť paliva pre tento typ lietadla je 12 971 kg a BOW / EOW je 28 583 kg. Po získaní prevádzkových parametrov nasledujú výpočty ako: priemerný počet pasažierov na jednom lete v danom mesiaci. Počet všetkých pasažierov na odletoch z letiska v Košiciach za jeden mesiac je vydelený počtom odletov, z čoho vyšiel priemerný počet pasažierov na jednom odlete na linke Košice – Viedeň Schwechat. Ďalej je podľa vzorca vypočítaná priemerná váha pasažierov a rovnako aj priemerná váha batožiny na jednom lete v danom mesiaci. Po vypočítaní týchto parametrov je ďalej vypočítaná priemerná voľná kapacitu na jednom lete v mesiaci. Priemerná voľná kapacita je v ďalšom kroku vynásobená aktuálnou priemernou celosvetovou sadzbou za prepravu nákladu prostredníctvom leteckej dopravy (2,37 USD / kg). Po vynásobení voľnej kapacity priemernou sadzbou vznikli možné výnosy na jednom lete na linke Košice – Viedeň Schwechat, pokiaľ nie sú brané do úvahy poplatky, ktoré sa spájajú s prepravou nákladu na košickom letisku. Následne sú od tohto zisku odpočítané všetky poplatky, ktoré má letisko v Košiciach stanovené. Z týchto výpočtov následne vzišiel potenciálny hrubý zisk letiska v Košiciach, pokiaľ sa berie do úvahy dokonalé využitie voľnej kapacity batožinových priestorov osobných lietadiel danou leteckou spoločnosťou na vybranej linke, na prepravu nákladu. V poslednom kroku je už len odpočítaný potenciálny hrubý zisk letiska v Košiciach s potenciálnym hrubým ziskom leteckej spoločnosti Austrian Airlines bez poplatkov. Dáta z každého kalendárneho roka (2022-2024) sú rovnakým spôsobom taktiež analyzované a vypočítané. Taktiež rovnakým spôsobom boli vykonané výpočty pre všetky letecké spoločnosti okrem Austrian Airlines (LOT, WizzAir, Ryanair, Swiss International Air Lines). Na základe všetkých výpočtov boli navrhnuté aj príslušné návrhy v poslednej časti článku.

Posledná časť článku je zameraná na navrhnutie novej optimalizácie ekonomických aspektov v oblasti prepravy nákladu (cargo) v batožinových priestoroch osobných lietadiel. Pri tvorbe návrhov sme sa zamerali na ekonomické aspekty zo strany leteckých spoločností a rovnako aj zo strany letiska v Košiciach. Letisko v Košiciach je spomínané z dôvodu, že práve odtiaľ sú poskytnuté štatistické údaje, s ktorými sa ďalej pracovalo.

Metóda výpočtu dostupnej kapacity v batožinových priestoroch osobných lietadiel a následných potenciálnych hrubých ziskov pri jej efektívnom využití

V prvom kroku je navrhnutých niekoľko vzorcov, ktoré sú využité na výpočet potrebných údajov, prostredníctvom ktorých je analyzovaná a vypočítaná voľná kapacita batožinových priestorov. Rovnako aj výpočet potenciálneho hrubého zisku leteckých spoločností pri zvýšenom využití dostupnej kapacity batožinových priestorov osobných lietadiel na prepravu nákladu a zároveň aj potenciálny hrubý zisk letiska v Košiciach (v ostatných prípadoch to môžu byť aj iné letiská) z poplatkov, ktoré sa viažu na poskytovanie cargo handlingových služieb.

Vzorec na výpočet voľnej kapacity batožinových priestorov, ktorá by mohla byť využitá na prepravu nákladu spolu s pasažiermi, a tým pádom by sa zvýšila efektívnosť využitia kapacity lietadla je nasledovný:

$$MTOW - [a] - [b] - [c] - [x] - [o] = [y]$$

Význam jednotlivých údajov a neznámych vo vzorci je nasledovný:

- MTOW – maximálna vzletová hmotnosť daného typu lietadla, ktorý bol využitý na danej linke.
- Neznáma [a] – BOW / EOW, čiže prázdna prevádzková hmotnosť daných typov lietadiel, ktoré boli využité na daných linkách.
- Neznáma [b] - maximálna možná hmotnosť paliva, ktorú má daný typ lietadla povolenú.
- Neznáma [c] – hmotnosť pasažierov, ktorá bola vypočítaná na základe údajov, ktoré boli poskytnuté z letiska v Košiciach. Konkrétne sa jednalo o údaje, ktoré obsahovali počet pasažierov, ktorí boli prepravení na danej linke odlietajúcej z Košíc. Následne je počet pasažierov vydelený počtom odletov na danej linke z košického letiska. Výsledná hodnota je potom vynásobená údajom 76,3 kg, ktorý bol dostupný z usmernenia agentúry EASA.
- Neznáma [x] – približná hmotnosť podanej a príručnej batožiny pasažierov. Hmotnosť je len približná z toho dôvodu, že neboli poskytnuté presné údaje o hmotnostiach batožín. Určená bola teda hodnota, že približne 55% resp. 40% všetkých pasažierov malo aj príručnú aj podanú batožinu.

- Neznáma [o] – hmotnosť nákladu prepravovaného na danom lete. Táto hodnota sa nenachádza vo všetkých výpočtoch. Nachádza sa len pri leteckej spoločnosti LOT.
- Neznáma [y] - voľná kapacita batožinových priestorov osobných lietadiel (v kg), ktorá zostala po odpočítaní všetkých potrebných hmotností od MTOW.

Návrh spočíva v tom, že tento vzorec by mohol byť užitočný ako nástroj na výpočet voľnej kapacity batožinových priestorov osobných lietadiel a taktiež využitý v ďalšej nadväznosti pri výpočtoch potenciálneho hrubého zisku leteckých spoločností a zároveň aj letiska pri využití voľnej kapacity batožinových priestorov. Ďalším vzorcom, ktorý by mohol slúžiť na výpočet potenciálneho hrubého zisku letiska v Košiciach z poplatkov, ktoré letecké spoločnosti platia za cargo služby je nasledovný:

$$((\text{voľná kapacita} \div 100) \times 21,87) + ((\text{voľná kapacita} \div 100) \times 21,87) + 38,26 = \text{potenciálny hrubý zisk letiska}$$

V tomto prípade sa uvažuje s hodnotami, ktoré sú v aktuálnom cenníku, ktorý bol poskytnutý z letiska v Košiciach. Sadzba 21,87 USD je suma za cargo handling každých 100 kg carga. Zároveň rovnaká suma platí aj za každých 100 kg vyloženého alebo naloženého nákladu do vozidla. Sadzba 38,26 USD je poplatok za bezpečnostnú kontrolu nákladu. V prípade ostatných letísk (iných ako letisko Košice) stačí do vzorca dosadiť aktuálne sumy poplatkov za odbavenie nákladu. Ďalej pre výpočet približného potenciálneho zisku by letecké spoločnosti mohli využiť nasledovný vzorec:

$$(\text{voľná kapacita} \times \text{aktuálna sadzba za 1 kg prepraveného carga}) - \text{potenciálny hrubý zisk letiska} = \text{potenciálny hrubý zisk leteckej spoločnosti}$$

Význam týchto vzorcov a následných výpočtov pre letecké spoločnosti a letiská vidím v tom, že ich môžu využiť, ako orientačný nástroj na približné výpočty nevyužitej kapacity batožinových priestorov a potenciálnych hrubých ziskov, či už zo strany leteckých spoločností, alebo letísk. Na základe využitia výpočtov ako orientačného nástroja by letecké spoločnosti, resp. letiská následne mohli zapojiť obchodné oddelenia. Obchodné oddelenia by mali za úlohu vytvorenie marketingového plánu, ktorý by zvýšil využitie voľnej kapacity batožinových priestorov a následne by došlo aj k zvýšeniu potenciálneho hrubého zisku leteckých spoločností a letísk. Zároveň by návrh mohol smerovať k vytvoreniu spoločného marketingového plánu, ktorý by obsahoval návrhy leteckých spoločností a rovnako aj letísk. Hlavným obsahom marketingového plánu by mali byť návrhy, ktoré budú obsahovať spôsoby efektívnejšieho využitia voľnej kapacity batožinových priestorov osobných lietadiel.

Zľavy z prístávacích poplatkov na letisku v Košiciach

Ďalším návrhom sú zľavy z prístávacích poplatkov na košickom letisku. Aktuálne letisko Košice ponúka zľavy z prístávacích poplatkov za zavedenie novej letovej linky. Týka sa to zavedenia novej letovej linky už do existujúcej destinácie, kde je zľava z poplatkov nižšia. V druhom prípade ide o zavedenie novej letovej linky z košického letiska do novej destinácie, ktorá sa doposiaľ nenachádza v ponuke.

Návrhom, ktorý vyplýva z výsledkov je možnosť zavedenia zľavy z prístávacích poplatkov pri určitom množstve odbaveného nákladu na letisku v Košiciach, či už na linkách smerujúcich do Košíc alebo z Košíc. Tento návrh by mohol dať do povedomia letisku v Košiciach možnosť vytvorenia marketingového plánu, ktorý by sa mohol zaoberať a inšpirovať práve týmto našim návrhom. Tento návrh by taktiež mohol motivovať letecké spoločnosti prepravujúce prevažne pasažierov k zvyšovaniu prepravy nákladu vo forme dokladania tovaru do nákladných priestorov osobných lietadiel. Práve letecké spoločnosti by profitovali v dvoch smeroch. Jednak by efektívne využili voľnú kapacitu batožinových priestorov osobných lietadiel, tým že by prepravili tovar a vykázali určité výnosy za jeho prepravu. Z druhej strany by ušetrili určitú čiastku z nákladov, ktoré platia za prístávacie poplatky na letisku v Košiciach. Naopak letisko v Košiciach by týmto spôsobom mohlo zvýšiť svoje príjmy z poplatkov, ktoré majú stanovené za cargo handlingové služby. Návrh výšky zliav, ktorými by letisko v Košiciach mohlo motivovať letecké spoločnosti k zvyšovaniu objemu prepraveného nákladu sú nasledovné:

Zľava z prístávacích poplatkov (v %)	Objem prepraveného carga za mesiac (v tonách)
10	15 - 22,4
15	22,5 - 29,9
20	30 – 37,4
25	37,5 +

Tabuľka 2: Návrh zliav z prístávacích poplatkov

Možnosť spolupráce letiska Košice s Swiss International Air Lines

Letecká spoločnosť Swiss International Air Lines ponúka prepravu rôznych typov tovaru, medzi ktoré patria napríklad:

- Farmaceutické výrobky (lieky, vakcíny, prístroje a iné),
- hodnotný tovar,
- tovar podliehajúci rýchlej skaze,
- živé zvieratá,
- všeobecný náklad a poštu.

Práve široká škála prepravovaných druhov tovaru by mohla byť zaujímavá pre vytvorenie novej spolupráce medzi košickým letiskom a švajčiarskou leteckou spoločnosťou SWISS. Zabezpečenie spojenia medzi letiskom Košice a letiskom v meste Zürich by bolo práve leteckou linkou, ktorá už existuje. Prevádzka linky na tejto trase je spustená od marca roku 2024. Táto informácia je potvrdená aj vyššie, keďže je vykonávaná

analýza a výpočet voľnej kapacity batožinových priestorov aj pre leteckú spoločnosť SWISS na trase Košice – Zürich. Toto letecké spojenie je podľa štatistík, ktoré boli poskytnuté z letiska v Košiciach, vo väčšine prípadoch prevádzkované vo frekvencii 13-krát za mesiac. Práve na základe výpočtov vzišlo zistenie, že pri letoch na tejto leteckej linke zostáva nevyužitá voľná kapacita nákladných priestorov lietadiel. Práve preto návrh obsahuje možnosť užšej spolupráce medzi košickým letiskom a leteckou spoločnosťou SWISS. Táto možná dohoda by priniesla určité benefity pre obe strany. Na strane leteckej spoločnosti by to mohlo byť zefektívnenie využitia voľnej kapacity, čo by smerovalo k zvýšeniu výnosov. Zároveň by zvýšenie výnosov nastalo aj pri prepravenom náklade, za ktorý si letecké spoločnosti účtujú prislúchajúce sadzby. Naopak benefitom pre letisko v Košiciach by bol potenciálny hrubý zisk na poplatkoch za cargo služby. Zároveň vznik ďalšej novej spolupráce s firmami, ktoré majú svoju výrobu orientovanú práve týmito smermi.

5. Záver

Preprava nákladu prostredníctvom leteckej dopravy je v súčasnosti čoraz viac využívaná a stáva sa každodennou súčasťou životov mnohých ľudí celého sveta. Zároveň je nenahradiiteľným spôsobom doručenia časovo senzibilného tovaru na dlhé vzdialenosti. Najmä keď sa jedná o životne dôležitý tovar, akým sú rôzne farmaceutické výrobky alebo ľudské orgány pripravené na transplantáciu. Práve jedným z využívaných spôsobov leteckej nákladnej dopravy sa zaoberala naša práca. Konkrétne sa jednalo o prepravu nákladu prostredníctvom využitia voľných kapacít nákladných priestorov osobných lietadiel.

Cieľom článku je komplexná analýza ekonomických a obchodných procesov v prípade zavedenia prepravy nákladu v cargo priestoroch osobných lietadiel. Pre splnenie cieľa bolo potrebné vykonať niekoľko krokov. Na úvod bola potrebná metóda zberu a syntézy údajov, s ktorými sme pracovali v ďalšej časti práce. V ďalšom kroku je využitá metóda literárnej rešerše, resp. analýza a výpočty pre zistenie aktuálnej situácie v oblasti prepravy nákladu v batožinových priestoroch osobných lietadiel. Následne po dôkladnej analýze štatistických údajov, ktoré boli poskytnuté košickým letiskom, je vyvedených viacero výsledných hodnôt, ktoré dokazujú, že je priestor na zvýšenie využitia voľnej kapacity nákladných priestorov osobných lietadiel. Ako bolo v predchádzajúcich častiach práce spomenuté, vzhľadom na malú vzorku (1 letisko), sú výpočty naviazané práve na košické letisko, ale ich aplikovateľnosť pri malých úpravách a aproximácii je možné použiť aj pri iných letiskách. Jednotlivé výsledné hodnoty sú následne pomocou komparácie údajov dôkladne vyhodnotené.

V závere článku sú návrhy niekoľkých možných optimalizačných prostriedkov, ktoré by mohli zefektívniť výnosy leteckých spoločností a zároveň aj výnosy letiska v Košiciach (v ostatných

prípadoch aj iných letísk). V prvom návrhu je navrhnutá možnosť využitia vzorcov na výpočet dostupnej kapacity batožinových priestorov, ktoré by po následnom využití mohli leteckým spoločnostiam a letiskám priniesť určité zvýšenie potenciálneho zisku. Ďalším návrhom sú možné zľavy z prístávacích poplatkov na letisku v Košiciach. Tento návrh by mohol priniesť benefity pre letecké spoločnosti a zároveň aj pre samotné letisko. Posledným návrhom je možnosť užšej spolupráce letiska v Košiciach s leteckou spoločnosťou Swiss International Air Lines. V tomto prípade sa opäť jedná o možné zvýšenie potenciálnych ziskov oboch zúčastnených strán. Pre možné aplikovanie týchto optimalizačných návrhov do praxe si však všetky spomínané možnosti vyžadujú dlhšie a najmä hĺbkové skúmanie, pretože ako už bolo spomínané, letecká doprava je jedným z najrýchlejších sa rozvíjajúcich priemyslov. Zároveň však možnosti, ktoré sú opísané v závere článku, pripadajú ako vhodné a po ich aplikovaní do praxe by mohli aspoň čiastočne prispieť k optimalizácii ekonomických aspektov zo strany leteckých spoločností a zároveň zo strany letísk

Referencie

- [1] AIR FREIGHT – HISTORICAL PERSPECTIVE, INDUSTRY BACKGROUND AND KEY TRENDS [online]. [cit. 2024-11-15]. Dostupné na internete: <https://airportsCouncil.org/wp-content/uploads/2020/03/CHAPTER-1-AIR-FREIGHT-%E2%80%93-HISTORICAL-PERSPECTIVE-INDUSTRY-BACKGROUND-AND-KEY-TRENDS.pdf>
- [2] Cargo capacity on the up in 2024: Damian Brett (2025-1-13) [online]. [cit.2025-3-17]. Dostupné na internete: <https://www.aircargonews.net/data-news/cargo-capacity-on-the-up-in-2024/1079538.article>
- [3] Growth in air cargo demand to decelerate in 2025, IATA says [online]. [cit.2025-3-17]. Dostupné na internete: <https://www.freightwaves.com/news/growth-in-air-cargo-demand-to-decelerate-in-2025-iata-says>
- [4] World Air Cargo Forecast 2022–2041 / Boeing [online]. [cit.2025-3-21]. Dostupné na internete: https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/market/assets/downloads/Boeing_World_Air_Cargo_Forecast_2022.pdf
- [5] HUANG, L. – WENSHU, W. – YI, S. – FUJUAN, L. – ZHE, L. 2024 Transportation Research Part B: Methodological vol. 188 [online]. [cit.2025-3-21]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191261524001875>
- [6] Significant growth in belly freight: Vienna Airport continues upward trend in cargo handling / Vienna International Airport [online]. [cit.2025-3-21]. Dostupné na internete: https://www.airport-suppliers.com/airport_press_release/significant-growth-in-belly-freight-vienna-airport-continues-upward-trend-in-cargo-handling/

- [7] VIE reports significant growth in cargo handling / Brigitte Gledhill November 24, 2024 [online]. [cit.2025-3-21]. Dostupné na internete: <https://cargoforwarder.eu/2024/11/24/vie-reports-significant-growth-in-cargo-handling/>



NÁVRH A REALIZÁCIA ELEKTRONICKÉHO RIADENIA MOTORA P66/5B

Dávid Koša
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The aim of the professional article is to familiarize the reader with the issue of optimizing electronic control for the P66/5B engine. The article consists of several parts in which the theory of two-stroke piston internal combustion engines, the principle of battery and electric ignition, the principle of carburetion and direct and indirect injection are specified in more detail. The article itself also contains a short description of the P66/5B engine. Within the practical part, the article describes the procedure for implementing the P66/5B engine, the course of the testing itself and the results obtained.

Keywords

Two-stroke engine, carburetion, ignition, injection, mixture

1. Úvod

V tomto odbornom článku sa zameriame na výskum optimalizácie elektronického riadenia motora P66/5B. Cieľom je vytvoriť funkčnú sústavu zapalovacej a palivovej sústavy pre ďalší vývoj ultraľahkého letúna Straton D7. Analýza testovania sa vykonáva na experimentálnom type motora (P66/5B) dôsledku konštrukčného riešenia štartéra.

Ako prvé sa zameriame na charakteristiku dvojtaktného motora a jeho činnosť, metodiku a jednotlivé metódy skúmania, ktoré boli pri písaní článku použité. Následne sa pozrieme na praktickú časť článku, kde si bližšie opíšeme problematiku postupu práce a realizácie motora P66/5B. Zameriame sa na postup nadstavovania zapalovacej a palivovej sústavy a porovnáme činnosť motora s upravenou konštrukciou oproti pôvodnému návrhu. Ako posledné si z analyzujeme zistené výsledky testovania a vyvodíme ďalšie závery, ktoré by mohli priniesť nové poznatky v oblasti vývoja do budúcnosti.

2. Metodika a metódy skúmania

Pri tvorbe článku boli využité rôzne zdroje ako napríklad: odborná literatúra (články, knihy, záverečné práce, manuály a príručky) a tiež internetové zdroje.

Metóda zberu a spracovania informácií: Využitá prioritne v teoretickej časti článku v súvislosti s princípom práce dvojtaktných motorov, karburáciou, priamym a nepriamym vstrekaním, funkcia snímačov a riadiacej jednotky a tiež charakteristikou motora P66/5B.

Metóda komparácie: Táto metóda sa v malej miere nachádza aj v teoretickej časti článku, ale primárne je využitá v praktickej časti, v rámci porovnávania prevádzky motora s upravenou konštrukciou oproti pôvodnej.

Metóda analýzy a syntézy: Primárne sa metóda analýzy uplatnila v praktickej časti práce, kedy sme pracovali na konštrukcii dvojtaktného motora a jednotlivých sústav s ním

spojených. V súvislosti s motorom P66/5B sme vykonávali nadstavovanie a aj samotné testovanie elektrickej a palivovej sústavy, za pomoci programu od spoločnosti IMF soft. Metóda syntézy vychádza zo samotnej analýzy (testovania a nadstavovania zapalovacej a palivovej sústavy) pri ktorej sme vyhodnotili zistené informácie pri porovnávaní práce motora s upravenou konštrukciou oproti pôvodnému návrhu.

3. Činnosť dvojtaktného motora

Konštrukcia dvojtaktného motora oproti štvortaktnému je výrazne jednoduchšia, pretože odpadá potreba sacieho a výfukového ventilu a tiež vačkovej hriadele. Významný rozdiel je aj v palivo-vzduchovej zmesi. Do paliva je potrebné pridávať olej dôsledku toho, že samotný motor nemá z konštruovanú mazacu sústavu.

3.1. Priebeh práce

1. Prvý zdvih piesta (nasávanie a kompresia):

Nad piestom:

Počas tejto časti cyklu samotný piest, ktorý sa pohybuje z dolnej úvrte do hornej úvrte v prvom rade zablokuje prepúšťací priestor, na základe ktorého sa samotná zmes paliva a vzduchu vytláčala do oblasti nad piestom. Po tejto časti cyklu následne piest zablokuje aj výfukový priestor, výsledkom čoho sa vytvorí osamotené (izolované) miesto vo valci, čím samozrejme automaticky dochádza k stláčaniu samotnej zmesi. [2]

Pod piestom:

V určitom čase, keď piest absolvuje takmer polovicu samotného zdvihu, spodný okraj piesta uvoľní sací priestor. Po otvorení sacieho kanálu, sa z karburátora do kľukovej skrine spravidla v danom momente začne nasávať zápalná zmes, výsledkom čoho ešte nie je ukončenie posledného úkonu. [2]

Po nasatí zápalnej zmesi, bezprostredne pred dovŕšením piestu do hornej úvrate, vzájomne medzi elektródami zapalovacej sviečky preskočí iskra. Vzniknutá iskra zapríčiní zážih, čím podnieti samotné zapálenie zmesi. [2]

2. Druhý zdvih piesta: (expanzia a výfuk)

Nad piestom:

V určitom čase, kedy pracuje druhý zdvih piestu vzniká v danom mieste nad piestom expanzia, ktorá pôsobí na piest tlačnou silou smerom z hornej úvrate do dolnej úvrate. [2]

Pod piestom:

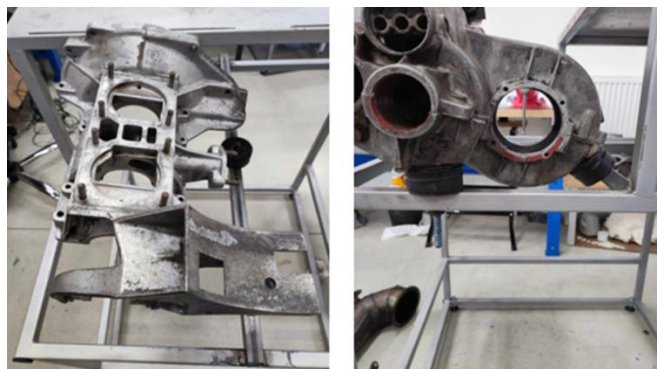
Vo chvíli, keď dôjde k uvoľneniu sacieho priestoru, dochádza k nasatiu zápalnej zmesi priamo do určeného priestoru kľukovej skrine. Následne, keď piest opäť absolvuje takmer polovicu samotného zdvihu smerom k dolnej úvrati, sa sací priestor zablokuje, čím automaticky dochádza k stláčaniu samotnej zmesi v kľukovej skrini. Bezprostredne pred absolvovaním fáze expanzie, dochádza k odkrytiu výfukového priestoru piestom, čím sa enormne zníži tlak vo valci. Po poklese tlaku, samotný piest odkryje prepúšťací priestor a zápalná zmes, ktorá prúdi z kľukovej skrine preplachuje tlakom z valca všetky nahromadené spaliny do vonkajšej atmosféry. V rovnakej dobe dochádza aj k nasatiu čerstvej palivovej zmesi, pripravenej na nadchádzajúci pracovný cyklus motora.

4. Priebeh realizácie úpravy konštrukcie motora P66/5B

4.1. Skladanie konštrukčných častí

4.1.1. Upevnenie motora na konštrukciu

Pri prvotnom návrhu upevnenia sme blok motora primontovali na jednoduchú konštrukciu z oceľových štvorhranných jaklov, ktoré sú spojené zváraním (najpoužívanejší technologický postup v spájaní oceľových materiálov). Do steny štvorhrannej rúry sme navŕtali dve diery s priemerom 8 mm a prostredníctvom nerezových skrutiek sme priskrutkovali vrchnú polovicu bloku motora ku konštrukcii. Dôsledku značnej nestability a predpokladanému zvýšenému chveniu sme sa rozhodli, že konštrukciu upravíme privarením jednej priečky navyše (štvorhranná rúra) a motor uchyťme do troch bodov na silentbloky. Blok motora sme spojili s obalom prevodovky pomocou skrutiek a do plášťa sme navŕtali otvory pre upevnenie silentblokov. Celú konštrukciu motora sme následne vsadili do predvŕtaných dier v konštrukcii a prizváraním jednej priečky navyše sme docielili stanovené 3 body upevnenia. Masívna konštrukcia vytvára dostatočnú pevnosť a pomerne dobrú stabilitu pre prenos rezonančných a váhových zaťažení motora. Výhodou takéhoto upevnenia motora je pomerne jednoduchá a rýchla demontáž napríklad pri preprave materiálu.



Obrázok 1 Upevnenie motora na konštrukciu. Zdroj: autor

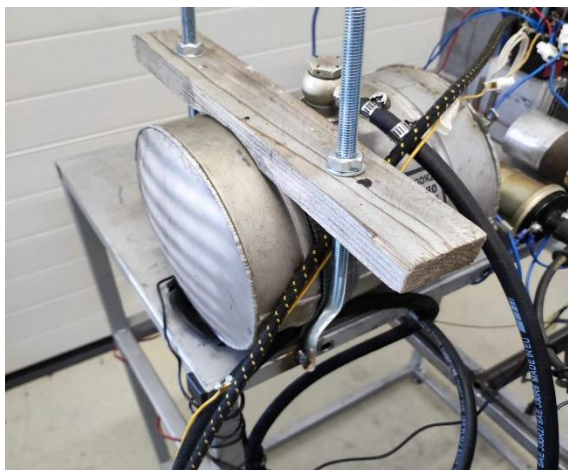
4.1.2. Palivové čerpadlo

Ako zdroj pre odvod paliva z nádrže sme využili malé, jednoduché palivové čerpadlo s výkonom 3 bary. Navzdory toho, že výrobca čerpadla neuvádza na výrobku označenie pre elektrické zapojenie bolo potrebné čerpadlo otestovať vo vonkajšom prostredí. Pri teste sme využili dve jednoduché pomôcky a to umelú nádobu s kvapalinou (voda) a batériu. Čerpadlo sme napojili na zdroj energie a ponorili do nádoby. Ako prvé bolo potrebné zistiť kladný a záporný pól batérie aby čerpadlo bolo schopné satia kvapaliny z nádrže. Ako náhle bolo čerpadlo funkčné a teda schopné zabezpečiť požadovanú činnosť naša pozornosť sa zamerala na určenie prepúšťacej a vratnej vetvy. Keďže pri plnej pracovnej záťaži čerpadla bola kvapalina vytláčaná z prepúšťacej vetvy skúsili sme zablokovat tok tejto vety, čo malo za následok nadmerné zvýšenie tlaku v čerpadle a teda automaticky došlo k odpusteniu nadbytočného množstva vody pomocou vratnej vetvy. Vďaka vykonaniu tohto testu sme dostali potrebné dáta pre ďalšie zapojenie čerpadla do sústavy.

4.1.3. Palivová nádrž

Nádrž, ktorá slúži na uskladnenie paliva pre prácu motora. V našom prípade sme využili plechovú nádrž z hydraulikkej kvapaliny s objemom viac ako 5 litrov. Na hlavnú odpúšťaciu vetvu paliva sme pridali holender pre jednoduché pripojenie k palivovej hadici. Čo sa týka vývodu pre odpúšťanie vzduchu využili sme skrutku do ktorej sme prevŕtali dieru, pomocou závitníka narezali závit a priamo do nej priskrutkovali druhý holender. Pred konečnou montážou sme oba holendery ešte dodatočne natreli silikónom pre zvýšenie tesnosti a zároveň pevnosti. Palivovú nádrž sme zapustili do navŕtaných dier na vrch konštrukcie a pomocou textilného pásu pevne zviazali. Pre zníženie vibrácií sme pod palivovú nádrž vsunuli dva kusy gumenej látky. Počas testovania došlo viackrát k vypadnutiu týchto gumených odrezkov a výrazným otrasom nádrže. Z toho dôvodu sme na palivovú nádrž prirobili kúsok drevenej výstuže so zaoblením pre lepšie dosadenie drevenej plochy a pomocou dvoch skrutkových tyčí a skrutiek primontovali ku konštrukcii. Výhodou umiestnenia nádrže na úplnom vrchu konštrukcie je možnosť privodu paliva do karburátora samospádom v prípade novej poruchy čerpadla. Následne sme pokračovali s montovaním palivových hadíc, ktoré sme vsunuli do holenderov a stiahli s hadicovými sponami (SK páska). Na hadicu sme ako bezpečnostný doplnok pridali uzatvárací ventil, vďaka čomu sami môžeme regulovať prietok paliva ďalej do sústavy.

Pozícia kohúta sa môže nachádzať v dvoch polohách vo vodorovnej (otvorený ventil) a zvislej polohe (zatvorený ventil). Ďalší významný komponent, ktorý sme v palivovej sústave použili bolo mechanické ťahlo na otváranie a zatváranie škrtiacej klapky v karburátore dôsledku nastavenia nasávania prietoku vzduchu do motora.



Obrázok 2 Palivová nádrž. Zdroj: autor

4.1.4. Elektronická sústava

V súlade s elektrickou sústavou sme ako zdroj napätia pre náš testovací motor zvolili 12 voltovú batériu (akumulátor). Tak ako aj palivovú nádrž tak aj batériu sme primontovali na vrch konštrukcie práve oproti palivovej nádrži. Keďže batéria má výrazne veľkú hmotnosť podarilo sa nám posunúť ťažisko viacej na stred, čím sa dosiahla vyššia stabilita konštrukcie. Pri montáži sme využili dve závitové tyče, ktoré sme zospodu podstavu zaistili šesťhrannými maticami s podložkami. Rovnakým spôsobom sme batériu upevnili aj z vrchnej časti akurát s tým rozdielom, že sme pridali kúsok drevenej výstuže pre kvalitnejšie upevnenie, aby nedochádzalo počas činnosti k posúvaniu.

V súvislosti s elektrickou sústavou sme využili dve indukčné cievky a tiež dva spínače jeden pre spínanie cievok a druhý pre samotné štartovanie. Ako doplnkové zariadenia sme využili indikátor na meranie podtlaku a zariadenie na meranie motohodín.



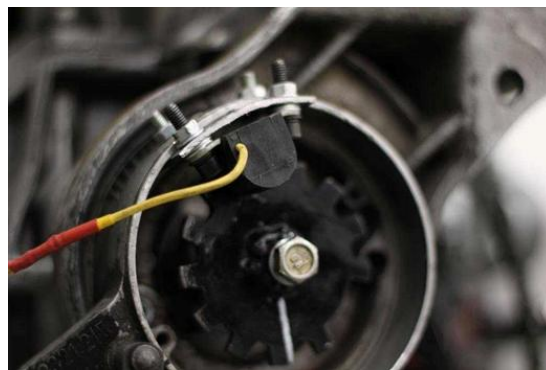
Obrázok 3 Umiestnenie batérie na konštrukciu. Zdroj: autor

4.2. Úprava konštrukcie zapalovacej a palivovej sústavy

Keďže cieľom práce bolo upraviť konštrukciu zapalovacej a palivovej sústavy využili sme elektronickú riadiacu jednotku a k nej snímač kľukového hriadeľa.

4.2.1. Snímač kľukového hriadeľa

Ide o malý elektrický snímač, určujúci polohu kľukového hriadeľa a tiež otáčky.



Obrázok 4 Induktívny snímač kľukového hriadeľa. Zdroj: autor

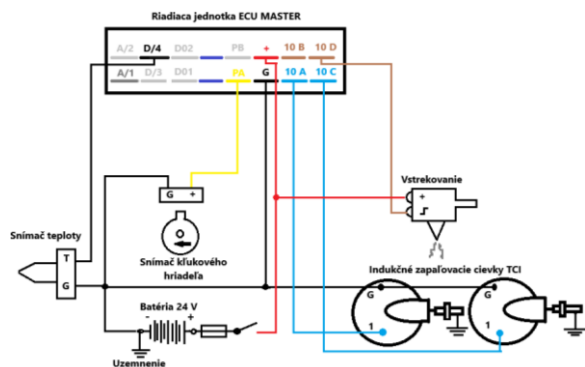
V našom prípade sme pracovali s indukčným snímačom kľukového hriadeľa. Použili sme ozubené oceľové koleso s 12 menšími a jedným väčším výrezom medzi zubami. Ako prvé sme sa zamerali na upevnenie ozubeného kolesa, pričom išlo o časovo náročnú montáž dôsledku presného dopasovania. Na základe toho, že poloha kolesa sa musí nachádzať kolmo na os hriadeľa museli sme niekoľko krát zvar odstrániť a znovu ozubené koleso správne privariť. Pri presnom upevnení sme využili sústruh do, ktorého sme koleso uchopili a od kontrovali, či je koleso správne vycentrované. Po namontovaní ozubeného kolesa na kľukový hriadeľ sme začali s montážou samotného snímača. K bloku motora sme priskrutkovali okrúhly oceľový domec do ktorého sme z boku navrtali dve diery pre uchytenie indukčného snímača. Dôsledku nedostatočnej vzdialenosti snímača od ozubeného kolesa bolo nutné prirobiť kúsok oceľového pliešku na, ktorý sme priskrutkovali snímač. Keďže oceľový domec mal okrúhly tvar, pliešok upevnení vo zveráku sme ohýbali búchaním kladiva do oblúka. Snímač sme postupne dopasovali do správnej polohy horizontálne aj vertikálne (vypodložením podložiek), keďže vzdialenosť od ozubeného kolesa podľa manuálu nesmie prekročiť 0,5 mm. Po správnom nastavení indukčného snímača kľukového hriadeľa a ozubeného kolesa sme sa zamerali na zapojenie riadiacej jednotky ECU MASTER.

4.2.2. ECU (Electronic control unit)

Elektronická riadiaca jednotka je malé počítačové zariadenie na úpravu zapalovacej a palivovej sústavy, na základe čoho systém správne nastaví uhol predzápalu a tiež dobu vstreku pre jednotlivé valce motora. Ide teda o sofistikovanejšie zariadenie pre optimalizáciu motora.

V rámci umiestnenia riadiacej jednotky sme postupovali nasledovne. Samotnú riadiacu jednotku sme vsunuli medzi dva pliešky (v tvare písmena L) priskrutkované ku konštrukcii. Medeným drôtom sme omotali a zviazali riadiacu jednotku

k obom plieškom, tak aby nedošlo k posunu počas vibrácií motora. Žiaľ po niekoľkých vykonaných testoch došlo k nechcenému posúvaniu ECU a bolo nutné prerobenie upevnenia. Navzdory toho, že nebolo veľa možností ako kvalitnejšie ECU upevniť, zvolili sme klasické elektrikárske sťahovacie pásky. Po vykonaní tejto úpravy uchytenia nedošlo k výraznejším problémom.



Obrázok 5 Grafické znázornenie zapojenia riadiacej jednotky. Zdroj: autor

4.2.3. Snímač Lambda sonda

Pre jednoduchšie a kvalitnejšie vykonanie testovania sme využili aj snímač teploty výstupných plynov, vďaka ktorému sme kontrolovali pomer zmesi.

Snímač lambda sonda sme priskrutkovali priamo do vopred vytvorenej diery so závitom v ocelevej rúre odvádzajúcej výstupné spaliny priamo do vonkajšej atmosféry. Zariadenie s digitálnym displejom sme provizórne pomocou sťahovacej pásky a drôtu pripevnili na vrch drevenej výstuže, pomocou ktorej sme upevnili batériu. Cieľom bolo získať, čo najlepší rozhľad na samotný displej. Po zapojení snímača lambda sonda sme skúšobne otestovali, či zariadenie správne funguje. Ako prvé sme zistili, že dôsledku kratšej výfukovej rúry namerané teplota a pomer bohatosti zmesi nie sú úplne korektné, pretože dochádza k nasatiu čerstvého vzduchu z okolitého prostredia. To má za následok nepresné dáta a teda je potrebné výstupnú rúru predĺžiť, aby sa vo výfuku znížil obsah kyslíka.



Obrázok 6 Snímač Lambda sonda. Zdroj: autor

4.2.4. Vstrekovacia dýza

V rámci konštrukčnej úpravy palivovej sústavy sme na miesto karburátora použili škrtiacu klapku s palivovou dýzou z automobilu Škoda Fabia. Cieľom je zabezpečiť plynulú a spoľahlivú dodávku paliva do sústavy.

Čo sa týka montáže vstrekovacej dýzy, tú sme vykonali po úspešnom ukončení testovania motora s karburátorom. V prvom rade bolo nutné zaliť praskliny, jamy a podobné nerovnosti nachádzajúce sa v liatinovom diely so škrtiacou klapkou. Ako výplň sme použili tekutý kov (epoxidové lepidlo). Tekutý kov sme rozmiešali v umelej nádobke, postupne aplikovali na vytvorené nerovnosti a následne nechali jeden deň vyschnúť. Po vyschnutí sme zaliate časti povrchu obrúsili excentrickou brúskou a vnútro diely vyhladili prevrtaním za pomoci vrtáku. Následne sme primontovali škrtiacu klapku, vstrekovaciu dýzu a celý diel priskrutkovali na dva oceľové šifty na miesto, kde bol predtým karburátor. Na záver sme pripojili palivovú hadicu z čerpadla a elektrické káble do konektora vstrekovacej dýzy. Červený kábel (kladný pól) sme napojili k štartéru a čierny kábel (záporný pól) k riadiacej jednotke. Vstrekovaciu dýzu sme v poslednom kroku dodatočne otestovali.



Obrázok 7 Škrtiaca klapka s palivovou dýzou. Zdroj: autor

5. Priebeh testovania

Testovanie sme vykonávali v počítačovom programe, ktorý bol vytvorený k riadiacej jednotke ECU MASTER.

Práca s počítačovým programom vyžadovala veľa trpezlivosti a predovšetkým samo vzdelávania na základe pridaného manuálu. V programe si môžeme zvoliť rôzne funkcie podľa toho, čo chceme zistiť. Ako prvé po spustení programu sa nám znázorní elektronická vizualizácia nášho motora na ktorej môžeme vidieť rôzne ukazovatele, ako napríklad otáčky motora, teplotu, moto hodiny, ladiace tlačidlo uhla predzápalu, ladiace tlačidlo doby vstrekovania a ďalšie iné. Druhou dôležitou časťou je grafické znázornenie predzápalu a vstrekovania. Mapy znázorňujú priebeh doby vstrek a uhla predzápalu od jednotlivých otáčok motora. Za pomoci týchto dvoch máp si vieme oba ukazovatele upravovať a vyladovať. Osciloskopický záznam znázorňuje grafické zobrazenie práce motora pri ktorej dochádza k meraniu a výpočtom spracovaných dát. Na

osciloskopickom zázname môžeme vidieť faktory týkajúce sa otáčok motora, index snímania zubov, uhol natočenia motora a tiež silu signálu od snímača kľukového hriadeľa. Poslednou dôležitou časťou programu je nastavenie správnej konfigurácie snímača kľukového hriadeľa. V tejto časti programu je potrebné zadať relevantné vstupné údaje pre snímanie kľukového hriadeľa: typ snímača, obmedzovač otáčok, počet bodov snímania, počet zubov na kolese, pomer otáčok, filtrácia otáčok a ďalšie. Ako bežný počítačový program disponuje aj funkciami pre uloženie údajov, nahranie údajov do programu, spustenie elektronickej vizualizácie, zastavenie motora (tlačidlo stop), nápoveda, informácie, rozšírenie nastavenia, funkcie programu a mnoho ďalších. [29,30]

5.1. Technické problémy a poruchy

Počas testovania sa vyskytlo aj mnoho problémov, ktoré často komplikovali priebeh testovania a teda bolo nutné ich odstrániť alebo minimálne eliminovať.

5.1.1. Zlomený zotrvačník

Prvou a výrazne najkomplikovanejšou technickou poruchou z hľadiska opravy bol zlomený zotrvačník, ku ktorej došlo pri vykonávaní testu výkonu motora.

Dôsledku následného nemožného naštartovania bolo potrebné motor demontovať a zistiť príčinu poruchy. Krátko po odmontovaní vrchnej polovice skrine prevodovky sme uvideli zlomený zotrvačník, na základe čoho sme usúdili, že vplyvom zlého nastavenia snímania zubov v programe, došlo k nepresnému časovaniu hádzania iskry, výsledkom čoho bolo cyklické namáhanie materiálu. Postupne sme začali motor demontovať po jednotlivých súčiastkach, aby sme sa dostali k jadrú problému. Pri otvorení skrine motora sme potrebovali odstrániť časť zotrvačníka pevne spojenú ku kľukovému hriadeľu. Úlomok sme nad rezali karbobrúskou a úderom kladiva odstránili. Následne sme vymenili kompletný diel zotrvačníka za náhradný a postupne pridávali ďalšie časti, ako napríklad lamelová spojka. Po uložení všetkých súčiastok na správne miesto sme vrchnú polovicu skrine natreli silikónovou hmotou, prilepili k druhej polovici skrine a momentovým kľúčom dotiahli všetky skrutky. Poskladaný motor sme opätovne namontovali na konštrukciu a pripojili ostatné časti sústavy (elektrická a palivová). Po zatvrdnutí silikónovej hmoty sme motor opäť začali spúšťať a vykonávať ďalšie testy, v rámci ktorých došlo k ďalším technickým problémom predovšetkým s výfukovou sústavou.



Obrázok 8 Zlomený zotrvačník. Zdroj: autor

5.1.2. Praskliny a lomy v spájaných častiach

Praskliny a lomy sa vyskytovali predovšetkým v súvislosti s výfukovou sústavou, kedy dôsledku vysokých vibrácií motora materiál nedokázal odolať namáhaniu. Výsledkom čoho bolo niekoľko násobné preváranie častí výfukovej rezonančnej sústavy a tiež vytváranie ďalších technických vylepšení pre možné zníženie podobných problémov.

5.1.3. Poškodené tesnenia pod hlavami valcov

Počas samotného testovania sme si všimli presakovanie paliva okolo hláv, na základe čoho sme sa rozhodli valce demontovať. Po rozobratí valcov bolo viditeľné poškodenie na oboch tesneniach, v rámci čoho sme museli absolvovať výmenu.

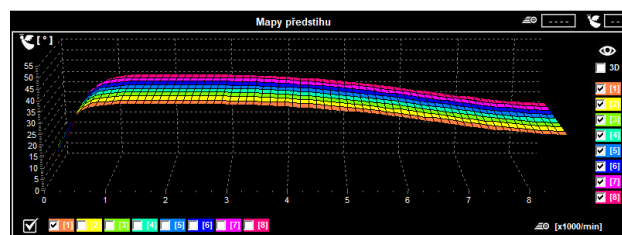
5.1.4. Práca motora na jeden valec

Ako posledný závažný technický problém, ktorý sa vyskytol bol nestabilný chod jedného z valcov. Túto poruchu sme odhalili pri kontrole sviečok, kedy jedna z nich nebola dostatočne prepálená (mokrú od palivo-olejovej zmesi).

V rámci tejto poruchy sme vymenili zapaľovacie sviečky a neskôr aj indukčné cievky. Pri samotných sviečkach sa vyskytol ďalší technický problém, kedy došlo k rušeniu riadiacej jednotky, čo zapríčinilo poruchu počítačového programu. Z toho dôvodu bolo nutné kúpiť ďalšiu sadu nových sviečok pre tento motor.

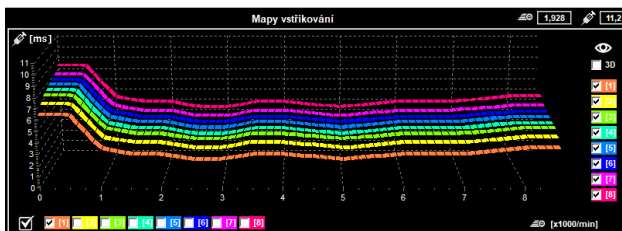
5.2. Nastavenie mapy uhla predzápalu a doby vstreku

Mapu uhla predzápalu sme nastavili pri jednotlivých otáčkach motora. Počas samotného testovania sme zistili, že optimálny uhol predzápalu pri voľnobežných otáčkach (približne 1100-1300) by mal byť približne 38° pred dovŕšením hornej úvrate. Postupne so zvyšujúcimi sa otáčkami (do 8000 ot/min) by sa mal uhol predzápalu znižovať kontinuálne na hodnotu 25° pred dosiahnutím hornej úvrate. Predpokladáme, že približne pri týchto zvolených hodnotách motor pracoval najefektívnejšie.



Obrázok 9 Mapa predstihu zapaľovania. Zdroj: autor

V rámci nastavenia doby vstreku sme mapu upravili nasledovne. Najvýraznejšia potreba vstreknutia paliva bola pri štartovaní, kedy sme dobu vstreku nastavili na 7 ms (do 500 ot/min). Ako náhle motor dosiahol voľnobežné otáčky dobu vstreku sme znížili takmer na 2,5 ms. So zvyšujúcimi otáčkami sa mapa mierne menila a hodnota sa pohybovala na úrovni okolo 3 ms.



Obrázok 10 Mapa doby vstreku. Zdroj: autor

6. Výsledky

V rámci výsledkov ku ktorým sme dospeli predpokladáme, že úprava pôvodnej konštrukcie motora P66/5B pre vývoj ultraľahkého letúna Straton D7, priniesla požadované informácie na základe, ktorých by sa mohol vyvíjať ďalší výskum tohto motora.

V rámci vykonaného testovania na experimentálnom type motora, dôsledku konštrukčného riešenia štartéra predpokladáme, že vplyvom úpravy zapalovacej a palivovej sústavy došlo k výrazne lepšiemu štartovaniu motora a tiež stabilnejšej práci na rozdiel od pôvodnej konštrukcie.

Pri samotnom štartovaní motor s karburátorom vykazoval výrazne väčšie problémy s dávkovaním paliva zatiaľ, čo pri palivovej dýze sme túto problematiku eliminovali.

V súvislosti so snímačom Lambda sonda sme odhalili aj približný pomer zmesi pri jednotlivých otáčkach motora. Pri nízkych otáčkach bola zmes bohatšia, zatiaľ čo pri vyšších otáčkach mierne chudobnejšia.

7. Záver

V tomto odbornom článku sme sa venovali testovaniu dvojtaktného motora P66/5B, pre ďalší vývoj motora ultraľahkého letúna Straton D7. Cieľom testovania bola úprava konštrukcie elektronického riadenia zapalovacej a palivovej sústavy. Samotná úprava spočívala v odstránení klasického mechanického zapalovania s kladivkami a nahradením elektronickej riadiacej jednotky s indukčným snímačom kľukového hriadeľa. V rámci palivovej sústavy išlo o odstránenie karburátora a jeho nahradenie škrtiacou klapkou s palivovou dýzou. Pre testovanie sme sa rozhodli použiť motor P66/5B dôsledku konštrukčného riešenia štartéra, keďže Straton D7 je roztáčaný za pomoci vrtule. Osobne verím, že v leteckom priemysle, ako aj v iných odvetviach činnosť dvojtaktných motorov nestradá svoj význam a ďalej bude vytvárať plnohodnotnú súčasť dlhodobej existencie spaľovacích motorov.

Referencie

- [1] KRÍŽ, Jozef. 2004. Lietadlové pohonné jednotky. Žilinská univerzita v Žiline, 2004. 264 s.
- [2] DENIS. Dvojtaktný motor: Aké má výhody či naopak nevýhody? In: AUTORIDE | Web o autách od autíčkarov [online] [cit. 19.02.2025]. Dostupné na internete: <https://autoride.sk/dvojtaktny-motor-jeho-princip-prace>

- [3] JENNINGS, Gordon. Two stroke tuner's handbook. Copyright, 1973.
- [4] BLAIR, Gordon P. The Basic Design of Two-Stroke Engines. SAE Publications Group, 1990. ISBN 1-56091-008-9.
- [5] BENČEK, Kristián . Kapacitní zapalování. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 59s.
- [6] HUSÁK, Pavel . Upravujeme motocykl pro závod. SNTL Nakladatelství technické literatury , 1972.
- [7] HUSÁK, Pavel. Motocykly s dvoudobým motorem. SNTL Nakladatelství technické literatury , 1978. 324 s.
- [8] ŠLEHOFFER, Vlastislav . Údržba a opravy vozu Trabant 601. SNTL Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [9] TOMÁŠ HAN. Trabant 601 slaví šedesátiny! Dvoudobá legenda byla laciná, ale také prachmizerná. In: Garaz.cz [online] [cit. 27.02.2025]. Dostupné na internete: <https://www.garaz.cz/clanek/auta-historie-technika-trabant-601-slavi-sedesatiny-dvoudoba-legenda-ktera-se-za-35-let-vyroby-skoro-nezmenila-21010028>
- [10] ŠTEFÁNIK , František . Športové lietanie, lietadlá, letci - 1988. Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1988.
- [11] How a fuel pump works. In: How a Car Works [online] [cit. 26.02.2025]. Dostupné na internete: <https://www.howacarworks.com/basics/how-a-fuel-pump-works>
- [12] ECU TESTING. ECU (Electronic Control Unit) explained. In: Ecuteesting.com [online] [cit. 26.02.2025]. Dostupné na internete: <https://www.ecuteesting.com/categories/ecu-explained/>
- [13] Detailing Devils Head Office. In: Detailingdevils.com [online] [cit. 26.02.2025]. Dostupné na internete: <https://www.detailingdevils.com/blog/essential-guide-to-electronic-control-units>
- [14] ANM. Príznaky poruchy a oprava snímače polohy kľukového hriadeľa. In: motofocus.sk [online] [cit. 26.02.2025]. Dostupné na internete: <https://motofocus.sk/technika/42442,priznaky-poruchy-a-oprava-snimace-polohy-klukoveho-hriadeľa>
- [15] Vstrekovacie trysky: príznaky poškodenia a náklady na výmeny ► AUTODOC BLOG. In: Autodoc.sk [online] [cit. 27.02.2025]. Dostupné na internete: <https://www.autodoc.sk/info/vstrekovacie-trysky-priznaky-poskodenia-a-naklady-na-vymen>



NÁVRH A REALIZÁCIA EXPERIMENTÁLNEHO HYBRIDNÉHO RAKETOVÉHO MOTORA

Jakub Kupčák
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article focuses on the design and construction of an experimental hybrid rocket engine with thrust control capability. The article further examines the methodological approaches that were used in the design and manufacture, in particular, the methods of analysis, synthesis and experimental verification of the proposed system. Using Autodesk Inventor and Fusion software, the process of 3D modelling of the individual engine components was carried out, from the initial designs to the final technical documentation. The practical part is devoted to the actual manufacturing and testing of the engine, describing the selection of materials, technological procedures, and compliance with safety measures. The main objective is to design and implement an experimental hybrid rocket engine with thrust control capability. The aim of the thesis has been fulfilled by the creation and successful testing of a working prototype of a hybrid rocket engine, which can be further used for teaching and further testing purposes.

Keywords

Hybrid rocket engine, Rocket engine, Rocket propulsion, Design and implementation

1. Úvod

Kozmické technológie zažívajú v aktuálnych rokoch výrazný rozmach, ktorý je možné pripísať snahám o nový výskum, ale aj rozvoju vesmírneho turizmu a komerčným vesmírnym letom. Zásadný vplyv na to má aj rozvoj súkromného sektora, kde dominujú spoločnosti ako SpaceX alebo Blue Origin. A preto napreduje aj výskum v oblasti raketových pohonov, s čím priamo súvisí aj rozvoj hybridných raketových motorov. Snaha zvyšovať bezpečnosť a spoľahlivosť raketového pohonu pri zachovaní jednoduchosti je výhodná práve pre hybridné raketové motory, ktoré presne toto umožňujú. Táto diplomová práca je zameraná na navrhnutie a následnú konštrukciu experimentálneho hybridného raketového motora. Cieľom tohto navrhnutia a zrealizovať funkčný prototyp motora, ktorý by umožňoval reguláciu ťahu. Prvá časť článku popisuje metodiku a metódy skúmania, ktoré boli pri písaní tejto práce použité. Primárne sa jedná o metódy analýzy a syntézy, ktoré boli využité pri tvorbe 3D modelov a projektovej dokumentácie. Ďalšou podstatnou metódou, ktorá bola využitá, je metóda experimentu. Táto metóda slúžila na získanie priebežných informácií v procese konštrukcie motora, ako aj na získanie potrebných dát testovaním výsledného systému. Druhá časť článku sa venuje opisu praktickej činnosti, výrobe a testovaniu motora. V rámci tejto kapitoly bol opísaný proces výberu a spracovania materiálov použitých na výrobu jednotlivých komponentov motora, boli stanovené aj bezpečnostné postupy a opatrenia a priebeh samotných testov a výsledkom a zisteniam.

2. Metodika a metódy skúmania

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce bolo navrhnuť a zrealizovať experimentálny hybridný raketový motor s možnosťou regulácie ťahu, vhodný pre ďalší výskum a vývoj

v tejto oblasti. Okrem toho sme si stanovili aj niekoľko ďalších čiastkových cieľov:

- Priblížiť históriu a súčasný stav v oblasti raketového pohonu
- Objasniť základné charakteristiky raketových motorov
- Zostaviť jednoduchý plán obsluhy nami realizovaného experimentálneho hybridného raketového motora
- Vykonať pokusné horenie
- Prakticky otestovať reguláciu ťahu funkčného modelu

2.1. Zdroje práce

Zdroje, ktoré boli použité pri vypracovaní tejto práce, sme rozdelili na primárne a sekundárne zdroje.

- Primárne zdroje práce predstavujú:
- Odborná literatúra
- Články a štúdie k danej problematike
- Knižné zdroje
- Vlastné merania a pozorovania získané počas výroby a testov motora

2.2. Metodika

Ako už bolo uvedené na začiatku kapitoly, hlavným cieľom práce bolo navrhnuť a zrealizovať experimentálny hybridný raketový motor s možnosťou regulácie ťahu. Postupovali sme nasledovne:

V prvej časti sme sa venovali teoretickým poznatkom o raketových motoroch. Priblížili sme si históriu, počiatky prvých pokusov s raketovým pohonom, neskorší postupný vývoj až po súčasnosť. V druhej časti kapitoly sme sa oboznámili so základným rozdelením raketových motorov, ich funkciou, rozdielmi, výhodami a nevýhodami jednotlivých typov. Oboznámili sme sa so základnými charakteristikami hybridných raketových motorov a bližšie sme si popísali funkcie niektorých častí raketových motorov.

V druhej časti práce sme sa venovali prvotnému návrhu nášho hybridného raketového motora, kde sme si ukázali postup návrhu jednotlivých častí.

V tretej časti sme sa zamerali už na samotný proces realizácie motora, výberu materiálu, jeho spracovania a skladby. Ďalej sme v tejto časti bližšie popísali jednotlivé komponenty nášho modelu a opísali ich funkčnosť. Zostavili sme plán a postupy pre zostavenie motora a jeho testovanie. Taktiež sme vypracovali jednoduché bezpečnostné opatrenia na základe identifikovaných rizík spojených s prevádzkou a testovaním motora, zhodnotili sme postup a výsledky testov, vytvorili sme niekoľko návrhov na zlepšenie efektivity a zvýšenie bezpečnosti vykonávaných testov a pokusov do budúcnosti a zhodnotili sme splnenie výsledkov práce a prínos práce.

2.3. Použité metódy

- Metóda zberu a spracovania odbornej literatúry – táto metóda bola použitá v prvej časti práce zameranej na teoretické poznatky o raketových motoroch, ich časti, charakteristikách a princípe činnosti.
- Metóda komparácie – bola využitá na porovnanie vlastností rôznych druhov pohonných hmôt, typov raketových motorov a ich častí.
- Metóda analýzy a syntézy – tieto metódy boli použité primárne v praktickej časti na návrh 3D modelu jednotlivých komponentov raketového motora.
- Metóda experimentu – bola využitá na overenie funkčnosti výsledného raketového motora

2.4. Použité nástroje

CAD softvér – programy Autodesk AutoCAD a Fusion boli využité na návrh 3D modelov a výkresovej dokumentácie, jednotlivých komponentov hybridného raketového motora. Použitie týchto softvérov umožnilo jednoducho a rýchlo vytvoriť modely všetkých častí a zároveň umožnili ich úpravu podľa potreby.

Záznamové a meracie zariadenia – Digitálny snímač hmotnosti na zistenie ťahu motora, videokamera GoPro Hero 3+, fotoaparáty a dron DJI mini 3 boli použité na vyhotovenie videozáznamov a fotodokumentácie z testovania a konštruovania motora, ktoré boli užitočné pre analýzu a vyhodnotenie výsledkov testovania ako aj posúdenie správania motora počas spaľovania.

3. Výsledky

3.1. Časti výsledného modelu HRM

3.1.1. Predný uzáver

je vysústružená časť zo žiaruvzdornej ocele. Jedná sa o 30 mm dlhú valcovitú časť s výstupkom. Podľa návrhu boli stredom uzáveru prevrtané dva otvory rôznych priemerov, v ktorých bol vytvorený závit, M6x0,75 pre vstrekoč a M12x1,5 pre pripojenie spojky hadicového vedenia okysličovadla. Pre zamedzenie úniku spalín zo spaľovacej komory boli v uzávère vytvorené dve drážky s hĺbkou 2,8 mm a šírkou 3,2 mm pre osadenie teflonových tesniacich O-kružkov. Tieto tesniace krúžky nie sú odolné voči tak vysokým teplotám ako očakávame počas horenia, preto je pravdepodobné, že sa počas dlhšej prevádzky prepália. Predpokladáme, že ich bude potrebné vymieňať po každom dlhšom zážihu motora. Za týmito drážkami je vyvrtaných osem otvorov s vnútorným závitom M4x0,5 pre uchytenie k plášťu motora.

Vstrekoč musí zabezpečiť dostatočný prívod okysličovadla do spaľovacej komory. Ako vstrekoč okysličovadla je použitá jednoduchá sporáková dýza na zemný plyn. Jedná sa o odnímateľný komponent, ktorý možno jednoducho demontovať a znovu upevniť k prednému uzávère, čo výrazne zjednodušuje zmenu konfigurácie pre budúce experimenty.

3.1.2. Spaľovacia komora a plášť

Hlavná časť spaľovacej komory predstavuje zároveň plášť motora. Je vyrobená z trubky z nerezovej ocele 304 s hrúbkou steny 3 mm. Dĺžka použitej trubky je 250 mm, vonkajší priemer je 42 mm a vnútorný priemer je 36 mm. Vnútorný priemer zároveň predstavuje priemer spaľovacej komory a vonkajší priemer palivového zrna. Dĺžka hlavnej časti spaľovacej komory je 175 mm. V prednej aj zadnej časti plášťa je priemer zväčšený na 37,5 mm, v prednej časti v dĺžke 30 mm a v zadnej časti v dĺžke 45 mm. Na prednej aj zadnej strane je takisto navrtaných osem otvorov, ktoré slúžia na upevnenie predného uzáveru a výstupnej dýzy k plášťu, respektíve spaľovacej komore spojovacím materiálom - skrutkami. Na oboch koncoch je taktiež vysústružené 45° skosenie vnútornej hrany, aby pri vtláčení uzáveru alebo výstupnej dýzy nedošlo k prasknutiu tesniaceho krúžka. Palivové zrno sa do spaľovacej komory vkladá cez lubovoľný koniec a po uzavretí spaľovacej komory je na oboch koncoch opreté o výstupnú dýzu, respektíve predný uzáver.

3.1.3. Výstupná Dýza

Výstupná dýza je rovnako ako predný uzáver vyrobená opracovaním žiaruvzdornej ocele opracovaním na sústruhu. Ide o jeden kus o dĺžke 50 mm, do ktorého boli z oboch strán pod príslušným uhlom vysústružené kužeľové otvory. Tesnenie je riešené rovnako ako pri prednom uzávère dvomi drážkami pre tesniace krúžky. Za drážkami je vyvrtaných osem otvorov s vnútorným závitom M4x0,5 pre uchytenie k plášťu motora.

3.1.4. Prívod okysličovadla

Úlohou systému prívodu okysličovadla je dodávať okysličovadlo k vstrekoču pod požadovaným tlakom.

Ako nádrž s okysličovadlom využívame 20 litrovú tlakovú nádobu čistého technického kyslíka s tlakom 300 barov. Jedná sa o plyný kyslík, ktorý, ako sme si už povedali, je vhodný práve na účely experimentácie. Nakoľko má dostatočne vysoký tlak a nie je potrebné použiť kompresor ani iný plyn na zvýšenie tlaku v systéme. Prívod okysličovadla je regulovaný ručne ovládaným redukčným ventilom na tlakovej fľaši.

Časti systému prívodu okysličovadla, ako sú hadice, gumové tesnenia ale aj samotná tlaková fľaša s kyslíkom, by mohli byť poškodené, ak by sa dostali do kontaktu horúcimi plynmi zo spaľovacej komory. Za normálnych okolností by k tomu nemalo dôjsť, avšak pri neočakávanom náhlom zvýšení tlaku v spaľovacej komore by k spätnému prešľahnutiu horúcich plynov mohlo dôjsť. Na ochranu častí systému, hlavne tlakovej fľaše, je medzi hadicami namontovaná poistka proti spätnému šľahnutiu.

Pre vedenie okysličovadla z tlakovej fľaše do ku vstrekovacej sú použité dve vystužené hadice na kyslík použiteľné pri maximálnom tlaku 20 barov. Dĺžky hadíc sú 2 a 5 metrov.

3.1.5. Tuhé palivo

Pri pôvodnom návrhu paliva sme počítali s konfiguráciou reverzného kvázi-hybridného motora. Plánovali sme použiť zmes dvojzložkovej epoxidovej živice a dusičnanu draselného (KNO_3) ako tuhé zrnó okysličovadla a propán-butánu ako plyného paliva. Vykonali sme niekoľko pokusov horenia zmesi živice a dusičnanu draselného s rôznymi zmiešavacími pomermi.

Príprava zmesi epoxidovej živice s dusičnanom prebiehala nasledovne. Ako prvé bolo potrebné zvoliť pomer, v ktorom budú tieto zložky zmiešavané. Prvá zmes bola v pomere 70% dusičnan draselný, 25% epoxidová živica, 5% dexetrín. Na zistenie hmotnosti jednotlivých dielov bola použitá digitálna kuchynská váha. Ako prvé sme do samostatnej nádoby nasypali dusičnan draselný s dexetrínom v potrebnej hmotnosti a premiešali sme ich spolu. Následne sme do druhej nádoby naliali potrebné množstvo epoxidovej živice a tvrdidla v pomere 10:1. Do epoxidovej živice sme potom postupne sypali zmes dusičnanu draselného a dexetrínu, zmes sme miešali kým nebol všetok dusičnan s epoxidom premiešaný do tuhej tvárnej zmesi. Túto zmes sme následne postupne vtláčili do formy a nechali v teple vytvrdnúť. Na ďalší deň po vytvrdnutí sme vzorku skúšobne zapálili. Pri druhej a tretej zmesi bol postup výroby totožný, rozdiel bol akurát ten, že sme nepoužili dexetrín a zmenili sme pomer epoxidovej živice a dusičnanu. Pri druhej zmesi bol pomer 75% dusičnanu draselného a 25% epoxidovej živice, pri tretej zmesi bol pomer 85% dusičnanu draselného a 15% epoxidovej živice. Pri pokusných horeniach najlepšie horela druhá zmes, 75% KNO_3 a 25% epoxidová živica. Nevýhodou tejto zmesi je, že pri horení sa epoxidová živica roztápa a rozteká. Po zhorení druhej zmesi ostalo na zemi a aj tyči, na ktorej bola zmes uchytená veľké množstvo usadenín, ktoré sme nedokázali vyčistiť. V prípade tretej zmesi, kde bolo epoxidovej živice použitej menej nezostalo po horení toľko usadenín, avšak zmes bola veľmi krehká, pri vyberaní z formy praskala a pri horení z nej odlamovali nezhorené kusy. Z tohto dôvodu sme sa preto neskôr rozhodli pre úpravu motora do konvenčnej konfigurácie – plyné okysličovadlo a tuhé palivo. Ako okysličovadlo sme zvolili plyný kyslík (GOX) a ako tuhé palivo termoplast akrylonitrilbutadiénstýrén (ABS) z 3D tlačne. Okrem

toho sme ako tuhé palivo v jednom z pokusov použili aj kyselinu polymliečnu (PLA), takisto z 3D tlačne. Tieto palivá boli zvolené vďaka jednoduchosti a rýchlosti ich výroby. Navyše palivové zrnó vytlačené na 3D tlačne je pomerne lacné, jednoducho sa sním manipuluje, a samo osebe nie je nijako nebezpečné. Plyný kyslík sme zvolili nakoľko je to veľmi silné oxidačné činidlo, ktoré sme mali k dispozícii v tlakovej fľaši s dostatočným tlakom a objemom.

3.1.6. Zapaľovanie

Zapaľovanie motora bolo riešené čo najjednoduchšie vložením horiaceho predmetu cez výstupnú dýzu do spaľovacej komory motora. V našom prípade bol tento horiaci predmet zápalka, ktorú sme vyrobili zmiešaním dusičnanu draselného s epoxidovou živcou. Zmes bola rovnaká ako pri pokusoch s touto hmotou pre reverzný hybrid. Touto zmesou sme následne obalili špajdlu a nechali vytvrdnúť. Výsledkom je jednoduchý, lacný a dostatočne spoľahlivý spôsob zapaľovania.

3.1.7. Konštrukcia pre uchytenie motora

Konštrukcia pre uchytenie motora slúži na stabilné upevnenie motora k pohyblivej časti skúšobného stojanu a prenos ťahovej sily produkovanej motorom.

Konštrukcia sa skladá z dvoch kusov oceľovej jokloviny s rozmerom 50x30 mm. Joklovinu sme na jednotlivé kusy požadovanej dĺžky narezali z jedného 6 metrového kusu kotúčovou brúskou. Tieto dva kusy sú k sebe prizvárané do tvaru písmena T. Na všetkých troch koncoch sme na stojanovej vŕtačke vyvŕtali otvory pre uchytenie k pohyblivému rámu skúšobného stojana spojovacím materiálom.

K tejto konštrukcii boli následne vertikálne prizvárané dva menšie kusy jokloviny s rozmerom 20x20 mm, ktoré sme takisto narezali uhlovou brúskou z jedného väčšieho kusu. Ich umiestnenie sme si rozmerali tak, aby boli od stredu konštrukcie rovnako vzdialené. Následne sme ich pomocou magnetických uholníkov a elektródovej zváračky prizvárali na vyznačené miesta. Tieto kusy slúžia ako podpory a výstuže oceľovej pásoviny, do ktorej je samotný motor uchytený.

Posledným kusom konštrukcie je 6 mm hrubá oceľová pásovina, ktorá slúži ako montážna plocha pre samotné uchytenie motora. Jej výška je 100 mm a dĺžka 140 mm. Narezaná bola z jednometrového kusu odrezaná na stojanovej listovej pile. Elektródovou zváračkou je prizváraná k dvom vertikálnym joklovinám a aj k „T“ rámu. V strede pásoviny je prevŕtaný otvor o priemere 20 mm, ktorý slúži na uchytenie motora predným uzáverom.

3.2. Identifikácia rizík spojených s prevádzkou

Účelom tejto časti je identifikovať a posúdiť riziká spojené s prevádzkou systému a opísať opatrenia, ktorými je možné tieto nebezpečenstvá obmedziť alebo odstrániť, s cieľom umožniť čo najbezpečnejšiu obsluhu nášho motora. Identifikované boli tri typy rizík:

- Katastrofické zlyhanie spaľovacej komory

Poškodenie v dôsledku pretlaku – v prípade nestabilného spaľovania alebo upchatia výstupnej dýzy tuhým palivom v dôsledku nedostatočného spaľovania môže dôjsť k roztrhnutiu spaľovacej komory, respektíve pláštá motora. Prípadná explózia môže do okolia vymrštiť úlomky spaľovacej komory alebo iných častí motora, ktoré môžu spôsobiť zranenia.

- Vystavenie aktuálne prevádzkovanému raketovému motoru

Vdýchnutie výstupných plynov – prevádzka raketového motora generuje výstupné plyny, ktoré môžu byť toxické alebo pôsobiť dráždivo. Predčasné zapálenie motora – v prípade chyby, ktorá by spôsobila predčasné zapálenie motora, môžu výstupné plyny zasiahnuť obsluhu motora počas príprav na zapálenie alebo počas pohybu vo vyhradenej oblasti za motorom. Poškodenie alebo vznik požiaru v dôsledku prevádzky motora – horúce výstupné plyny produkované motorom môžu spôsobiť poškodenie okolitých zariadení alebo budov alebo zapríčiniť požiar.

- Manipulácia s horúcimi časťami motora po teste

Popáleniny spôsobené manipuláciou s časťami motora: Po zastavení horenia budú časti motora horúce. Manipulácia s nimi môže spôsobiť popálenie personálu.

3.2.1. Opatrenia

Dodržiavať stanovené podmienky BOZP, mať vyznačený bezpečnostný priestor v okolí motora a zamedziť vstup do vyznačeného priestoru počas a bezprostredne po vykonaní testu. V prípade nedodržania stanovených podmienok a postupov BOZP, narušenia bezpečnostného priestoru alebo inej nepredvídanej udalosti bude test, respektíve prevádzka motora okamžite prerušená.

3.3. Priebeh testovania

Prvý test sme vykonali s použitím 1,5 mm hrubého plastového palivového zrna z PLA plastu vytlačeného na 3D tlačiarňi a s použitím plynovej dýzy s priemerom 0,8 mm. V tomto teste sme chceli pri krátkom horení overiť správnu tesnosť jednotlivých častí, overiť spôsob zapáľovania a správanie motora pri prevádzke. Test prebiehal podľa popísaného postupu. Po zapálení zápalky a jej vsunutí do motora sme pomaly otvárali prívod okysličovadla a zvyšovali tým tlak a teplotu v spaľovacej komore. Pomalý nárast teploty však spôsobil to, že materiál palivového zrna sa začala taviť a stekať z hornej časti spaľovacej komory a vytekať do výstupnej dýzy. Počas celej doby horenia s nízkym tlakom kyslíka z výstupnej dýzy vychádzal hustý biely dym a motor bol pomerne tichý. Až po zvýšení tlaku okysličovadla na hodnotu 11 barov spôsobil znateľný nárast hlučnosti motora, z výstupnej dýzy prestal vychádzať dym a vyšľahol menší plameň. V mieste roztavenia palivového zrna sme však mohli sledovať nárast teploty povrchu pláštá motora, preto sme sa rozhodli test prerušiť. Čas od vloženia zápalky do motora po prerušenie testu bol 47 sekúnd, pričom horenie pri vyššom tlaku okysličovadla, 11 až 15 barov, trvalo 9 sekúnd. Po ukončení testu sme odpojili prívod okysličovadla a nechali motor na otvorenom priestranstve chladieť približne 30 minút. Po uplynutí tohto času už boli plášť motora aj ostatné časti dostatočne chladné na manipuláciu s nimi. Po demontáži motora zo skúšobného stojanu sme vykonali

jeho bližšiu inšpekciu, pri ktorej sme si všimli, že do hrdla výstupnej dýzy bol v malej miere zatečený roztavený plast, ktorý nebol dokonale spálený. Napriek tomu bolo možné motor na oboch koncoch pomerne ľahko otvoriť a skontrolovať tak lepšie vnútro motora. Vnútorne steny spaľovacej komory ako aj predného uzáveru boli pokryté silnou vrstvou spalín. Na stenách spaľovacej komory v zadnej časti v spoji s výstupnou dýzou bol niekoľko milimetrov hrubý nános nespáleného plastu, ktorý jednej strany vtekal priamo do dýzy. Po kontrole môžeme povedať, že nedošlo k žiadnemu poškodeniu nijakej časti testovacej zostavy. Tesniace krúžky ostali všetky neporušené. Všetky tri časti motora sme na niekoľko desiatok minút ponorili do technického benzínu, kde sa väčšia časť usadenín odmočila a niektoré väčšie kusy zatuhnutého plastu sme odstránili manuálne. Výsledok prvého testu hodnotíme ako uspokojivý, ciele tohto testu boli naplnené, vykonali sme úspešné zapálenie a overili sme funkčnosť a tesnosť navrhutej zostavy. Okrem toho sme zistili aj to, že PLA nie je vhodným typom paliva a nebude pri ďalších testoch použité.

Druhý test sme vykonali s použitím plastového palivového zrna z ABS plastu vytlačeného na 3D tlačiarňi s priemerom 36 mm a hrúbkou steny 10 mm a s použitím plynovej dýzy s priemerom 0,8 mm. V tomto teste sme chceli overiť správanie motora pri dlhšom čase horenia, odmerať ťah motora a overiť schopnosť regulácie ťahu zmenou tlaku privádzaného okysličovadla. Po znalostiach nadobudnutých pri prvom testovaní sme po vložení horiacej zápalky do motora zvyšovali tlak okysličovadla rýchlejšie, aby sa palivo nezačalo taviť a tiecť. Prvotne sme tlak okysličovadla nastavili na 11 barov. Pri tomto tlaku sa nám podarilo namerať ťah 0,5 kg – 5N. Pri postupnom zvyšovaní tlaku na hodnotu 14 barov narástol ťah na hodnotu 0,8 kg – 8N. Tlak okysličovadla sme následne rýchlo zdvihli na hodnotu približne 18 barov, ťah stúpol na hodnotu 1,5 kg – 15N a po ďalšom pomalom zvýšení tlaku na hodnotu 20 barov sa ťah zvýšil na hodnotu 1,7 kg – 17N. Po dosiahnutí tejto hodnoty sme tlak okysličovadla ďalej dvíhať neskúšali, nakoľko je to limitná hodnota pre hadice a aj redukčný ventil, naopak tlak sme opäť znížili na hodnotu 12 barov, čo malo za následok zníženie ťahu na hodnotu 1 kg – 10N. Celá doba horenia bola 114 sekúnd a pokus s reguláciou ťahu trval 74 sekúnd. Po ukončení testu rovnako ako pri prvom teste nechali motor chladieť na otvorenom priestranstve niekoľko desiatok minút, teplotu pláštá a výstupnej dýzy sme kontrolovali infračerveným bezdotykovým teplomerom. Teplota pláštá bola po približne 20 minútach 59°C až 65°C v závislosti od miesta merania, najvyššia teplota bola teplota výstupnej dýzy, ktorá bola v najteplejšom mieste 166°C. Po vychladnutí motora a jeho demontáži sme vykonali inšpekciu jednotlivých častí. Na rozdiel od prvého pokusu nebolo tentokrát plastové palivo zatečené do výstupnej dýzy a ani v spaľovacej komore nezostali žiadne nespálené kusy paliva, všetky vnútorné časti však boli pokryté vrstvou spalín. Po kontrole všetkých častí sme mohli zhodnotiť, že nedošlo k poškodeniu žiadnej časti zostavy, iba dva tesniace krúžky boli vplyvom vysokej teploty zničené - jeden na výstupnej dýze a druhý na prednom uzáveri. Všetky tri časti motora sme opäť na niekoľko desiatok minút ponorili do technického benzínu, kde sa väčšina usadenín odmočila a zvyšok sme vyčistili oceľovým kartáčom.

Tretí test sme vykonali, rovnako ako pri druhom teste, s použitím plastového palivového zrna z ABS plastu vytlačeného

na 3D tlačiarňi s priemerom 36 mm, avšak vnútornú geometriu sme zmenili z jednoduchého kruhového otvoru na tvar hviezdy a pôvodnú 0,8 mm plynovú dýzu sme vymenili za väčšiu priemerom 1,4 mm. V tomto teste sme chceli porovnať horenie a ťah s predchádzajúcim motorom, nakoľko pri novej geometrii paliva je počiatková plocha horenia väčšia a prietok okysličovadla je pri rovnakom tlaku s použitím novej dýzy takisto vyšší. Test prebiehal prakticky rovnako ako predchádzajúci. Po zapálení zápalky sme začali tlak okysličovadla rýchlo zvyšovať na hodnotu 10 barov, nepodarilo sa nám však dosiahnuť zapálenie palivovej zmesi, z motora niekoľko sekúnd vychádzal iba hustý dym. Až po výraznom znížení tlaku okysličovadla došlo k zapáleniu. Okamžite po zapálení sme opäť začali zvyšovať tlak privádzaného okysličovadla, tento nárast bol pozorovateľný na výstupnom plameni, nepodarilo sa nám však namerať žiadny ťah. Tento fakt bol pravdepodobne spôsobený zmenou štruktúry paliva, keďže tentokrát sme nepoužili pri tlači plnú výplň, ale iba 40% výplň. Myslíme si, že kvôli tomu malo palivo moc krehkú štruktúru a časť z neho sa poodlamovala a nespálila. Aj napriek pomerne dlhej dobe horenia nebolo všetko palivo dokonalo spálené. Po rozobratí motora boli na konci spaľovacej komory pri výstupnej dýze ako aj na povrchu výstupnej dýzy usadeniny nespáleného plastu.

3.4. Výsledky

Počas realizácie práce sa vyskytli rôzne komplikácie. Napríklad výroba jednotlivých komponentov sa pre nás ukázala ako pomerne komplikovaná. Vybavenie ktoré sme mali k dispozícii nebolo úplne vhodné, kvôli čomu bola výroba veľmi pomalá a komplikovaná, pričom niektoré aspekty návrhu sme museli meniť, aby sme ich dokázali zrealizovať. Ďalej testy v konfigurácii reverzného hybridu s tuhým okysličovadlom vo forme epoxidovej živice s dusičnanom draselným a plyným palivom propán-butánom sa nám nepodarilo realizovať. Na zabezpečenie dostatočného prívodu plynu by bol potrebný kompresor na zvýšenie jeho tlaku, ktorý sme nemali k dispozícii, okrem toho pokusy s dusičnanom v kombinácii so spojivom ukázali, že horenie produkuje veľké množstvo usadenín a odpadu, ktoré by mohlo vtekať do dýzy, čo sme riskovať nechceli. Napriek tomu môžeme konštatovať, že sme dokázali vytvoriť funkčný a použiteľný model, ktorý splnil všetky nami stanovené ciele a ďalej môže slúžiť potrebám katedry.

3.5. Návrhy na zlepšenie

V rámci možného zlepšenia motora je potrebné spomenúť hlavne optimalizáciu výstupnej dýzy a vstrekovania okysličovadla. Na naše účely – overenie funkčnosti návrhu a jednoduché testovanie regulácie ťahu sú naše návrhy dostatočné, pre potreby vyššieho ťahu, napríklad pri zakomponovaní do letuschopnej rakety, však nestačia. Pre pozemné testovanie si myslíme, že by bolo do budúca vhodné skonštruovať vlastný skúšobný stojan, ktorý by umožňoval jednoduchšiu manipuláciu s motorm, ale aj možnosť merať viaceré parametre chodu motora, napríklad tlak a teplotu v spaľovacej komore, rýchlosť výstupných spalín a podobné, čo by však vyžadovalo značné investície a konštrukčné zásahy do existujúceho motora, prípadne návrh a implementáciu nových špeciálne navrhnutých častí. vyššiu bezpečnosť pri testovaní, napríklad zakomponovaním ochrannej konštrukcie, ktorá by zachytila prípadný únik spalín pri netesnosti. Ďalej považujeme

za vhodné implementovať elektrické zapáľovanie ovládané na diaľku, aby nebolo potrebné pohybovať sa okolo motora s horľavinami v rukách a zapojeným prívodom okysličovadla, čo by v prípade prehliadnutého úniku takmer určite spôsobilo zranenie obsluhy. Pravdepodobne úplne ideálne by bolo zakomponovať aj celý systém okysličovania motora do skúšobného stojanu a možnosť ovládať prakticky celý chod motora, od zapálenia až po zhasnutie, diaľkovo.

Konkrétne úpravy a doplnky však závisia od konkrétnych budúcich požiadaviek, ktoré sú vo výsledku diktované plánovaným použitím tohto motora.

4. Záver

Práca bola zameraná na návrh a realizáciu experimentálneho hybridného raketového motora. Hlavným cieľom bolo navrhnúť a následne vyrobiť hybridný raketový motor s možnosťou regulácie ťahu.

V rámci práce sme vykonali tri skúšobné testy, s cieľom overiť funkčnosť návrhu. Výsledky jednotlivých testov ukázali, že náš návrh hybridného raketového motora je funkčný, schopný opakovanej prevádzky bez toho, aby došlo k poškodeniu jeho hlavných častí. V prvom teste sme úspešne overili zapálenie a horenie motora a tesnosť všetkých častí, test sme však prerušili z dôvodu nevhodnej deformácie paliva a nerovnomerného zahrievania plášťa motora. V druhom teste sa nám podarilo úspešne vykonať reguláciu ťahu motora regulovaním tlaku okysličovadla. V treťom, poslednom teste, sme chceli opäť merať ťah motora, ukázalo sa však, že nami zvolená konfigurácia paliva pre tento test nebola vhodná a nepodarilo sa nám zopakovať meranie z predošlého testu. Na základe výsledkov a priebehu testov navrhujeme niekoľko možností na zlepšenie, ako je optimalizácia kritických častí motora alebo vytvorenie samostatnej testovacej zostavy vrátane bezpečnostného krytu motora.

Referencie

- [1] BENSON, Tom. Brief History of Rockets. In: *Nasa.gov* [online] [cit. 07.10.2024]. Dostupné na internete: https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/TRC/Rockets/history_of_rockets.html
- [2] PUBLISHED, Elizabeth Howell. The History of Rockets. In: *Space.com* [online] [cit. 09.10.2024]. Dostupné na internete: <https://www.space.com/29295-rocket-history.html#section-rockets-of-today-and-tomorrow>
- [3] NEUFELD, Michael. Robert Goddard and the First Liquid-Propellant Rocket. In: *National Air and Space Museum* [online] [cit. 10.10.2024]. Dostupné na internete: <https://airandspace.si.edu/stories/editorial/robert-goddard-and-first-liquid-propellant-rocket>
- [4] LEISHMAN, J. Gordon. History of Rockets & Space Flight. In: *eaglepubs.erau.edu* [online]. 2023 [cit. 10.10.2024]. DOI: <https://doi.org/10.15394/eaglepub.2022.1066.n3a>
- [5] ELDRIDGE, Alison. Britannica Money. In: *Britannica.com* [online] [cit. 23.04.2025]. Dostupné na internete: <https://www.britannica.com/money/SpaceX>

- [6] PAWEŁ SURMACZ, GRZEGORZ RARATA. Hybrid Rocket Propulsion Development and Application. In: *ResearchGate* [online] [cit. 15.11.2024]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/283216967_Hybrid_Rocket_Propulsion_Development_and_Application
- [7] SUTTON, George P, BIBLARZ, Oscar. *Rocket Propulsion Elements*. 9. vyd. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2017. ISBN 9781118753651.
- [8] GUERY, Jean-Francois et al. Solid propulsion for space applications: An updated roadmap. In: *Acta Astronautica* [online]. 2010, roč. 66, č. 1-2, s. 201-219 [cit. 20.02.2025]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.05.028>
- [9] ESA explores microlaunchers for small satellites. In: *Esa.int* [online] [cit. 06.12.2024]. Dostupné na internete: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/ESA_explores_microlaunchers_for_small_satellites
- [10] SPACE ONE. In: *SPACE ONE* [online] [cit. 21.11.2024]. Dostupné na internete: https://www.space-one.co.jp/index_e.html
- [11] KUENTZMANN, P. *Introduction to Solid Rocket Propulsion* [online] [cit. 09.12.2024]. Dostupné na internete: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA425146.pdf>
- [12] SACKHEIM, Robert Lewis. Spacecraft Chemical Propulsion. In: *Encyclopedia of Physical Science and Technology* [online]. 2003, s. 403-430 [cit. 15.01.2025]. DOI: <https://doi.org/10.1016/b0-12-227410-5/00904-2>
- [13] PRICE, Edward, BIBLARZ, Oscar. Rocket - Liquid-propellant rocket engines. In: *Encyclopedia Britannica* [online]. Dostupné na internete: <https://www.britannica.com/technology/rocket-jet-propulsion-device-and-vehicle/Liquid-propellant-rocket-engines>
- [14] SPACEX. SpaceX Falcon Heavy. In: *SpaceX* [online] [cit. 26.02.2025]. Dostupné na internete: <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-heavy/>
- [15] CHELARU, Teodor-Viorel, MINGIREANU, Florin. Hybrid rocket engine, theoretical model and experiment. In: *Acta Astronautica* [online]. 2011, roč. 68, č. 11-12, s. 1891-1902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.12.008>
- [16] GREATRIX, David R. Regression rate estimation for standard-flow hybrid rocket engines. In: *Aerospace Science and Technology* [online]. 2009, roč. 13, č. 7, s. 358-363 [cit. 03.01.2025]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2009.07.003>
- [17] ZILLIAC, Gregory, KARABEOGLU, M. Hybrid Rocket Fuel Regression Rate Data and Modeling. In: *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* [online]. 2006 [cit. 05.01.2025]. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2006-4504>
- [18] WEI, Shih-Sin et al. A Review of Recent Developments in Hybrid Rocket Propulsion and Its Applications. In: *Aerospace* [online]. 2024, roč. 11, č. 9, s. 739. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace11090739>
- [19] PETRAROLO, Anna, KOBALD, Mario, SCHMIERER, Christian. *Characterization of Advanced Hybrid Rocket Engines* [online] [cit. 10.11.2024].
- [20] OWISI, Farouk. *DESIGN AND TESTING OF THE IGNITION SYSTEM FOR HYBRID ROCKET MOTOR* [online] [cit. 13.11.2024]. Dostupné na internete: https://asat.journals.ekb.eg/article_27161_c96a195758477d5e4ab20f53e2eca362.pdf
- [21] Nuclear Rockets. In: *Glenn Research Center | NASA* [online] [cit. 19.02.2025]. Dostupné na internete: <https://www1.grc.nasa.gov/historic-facilities/rockets-systems-area/7911-2/>
- [22] WELCH, Nikki, SMITH, Kaveon. The Propulsion We're Supplying, It's Electrifying - NASA. In: *NASA* [online]. Dostupné na internete: <https://www.nasa.gov/humans-in-space/the-propulsion-were-supplying-its-electrifying/>
- [23] JOBIN, Olivier et al. Hypergolic ignition of hybrid rocket fuels in a slab burner experiment. In: *Combustion and Flame* [online]. 2025, roč. 274 [cit. 18.03.2025]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113948>
- [24] PRADHAN, S. K., KEDIA, Vedant, KOUR, P. Review on different materials and their characterization as rocket propellant. In: *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, roč. 33, č. 8 [cit. 20.02.2025]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.960>
- [25] OZTAN, Cagri et al. 3D printed ABS/paraffin hybrid rocket fuels with carbon dots for superior combustion performance. In: *Combustion and Flame* [online]. 2021, roč. 225, s. 428-434 [cit. 10.12.2020]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.11.024>
- [26] KOPACZ, Wioleta et al. Hydrogen peroxide – A promising oxidizer for rocket propulsion and its application in solid rocket propellants. In: *FirePhysChem* [online]. 2022, roč. 2, č. 1, s. 56-66 [cit. 26.12.2024]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpc.2022.03.009A>
- [27] *MAE 6430 -Propulsion Systems, II* [online] [cit. 28.12.2024]. Dostupné na internete: http://mae-nas.eng.usu.edu/MAE_6530_Web/New_Course/Section3/section2.1.pdf
- [28] TARIFA, Mariana, PIZZUTI, Loreto. THEORETICAL PERFORMANCE ANALYSIS OF HYBRID ROCKET PROPELLANTS AIMING AT THE DESIGN OF a TEST BENCH AND a PROPULSIVE SYSTEM. [cit. 28.12.2024]. DOI: <https://doi.org/10.13009/EUCASS2019-488>
- [29] Hybrid Propellants. In: *Andøya Space Education* [online] [cit. 27.12.2024]. Dostupné na internete: <https://learn.andoyaspace.no/ebook/student-rocket-pre-study/rocket-propellants-2/hybrid-propellants/>

- [30] CALABRO, M. Overview on Hybrid Propulsion. In: *www.eucass-proceedings.eu* [online], s. 353-374 [cit. 29.12.2024]. DOI: <https://doi.org/10.1051/eucass/201102353>
- [31] MANSHA et al. Comparison Study of Solid Rocket Motor Grain Geometries. In: *International Journal of Science, Engineering and Management (IJSEM)* [online]. 2024, roč. 11, č. 2, s. 32 [cit. 30.12.2024]. Dostupné na internete: <https://ijsem.org/article/6%20feb.pdf>
- [32] NASA SPACE VEHICLE DESIGN CRITERIA (CHEMICAL PROPULSION) SOLID PROPELLANT GRAIN STRUCTURAL INTEGRITY ANALYSIS [online] [cit. 29.12.2024]. Dostupné na internete: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740011276/downloads/19740011276.pdf>



OPTIMALIZÁCIA TECHNICKÝCH A LOGISTICKÝCH PROCESOV NA ZVÝŠENIE VYŤAŽENOSTI LIETADIEL V KOMBINOVANEJ LETECKEJ PREPRAVE

Paulína Lehocká
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Ján Rostáš
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Štúdiá sa zameriava na optimalizáciu logistických a technických procesov v kombinovanej leteckej doprave, s dôrazom na efektívne využívanie voľnej kapacity v nákladových priestoroch osobných lietadiel. Cieľom je analyzovať súčasný stav a navrhnúť opatrenia na lepšie využitie dostupných kapacít na pravidelných linkách. Teoretická časť poskytuje prehľad o štruktúre leteckej nákladnej dopravy, kategorizácii dopravcov a technických špecifikáciách manipulácie s tovarom. Analytická časť vychádza z dát Letiska Košice za roky 2022 – 2024, pričom hodnotí počty cestujúcich, objem nákladu, mieru obsadenosti letov a voľnú hmotnosť lietadiel. Výsledky poukazujú na sezónne výkyvy a potenciál na zvýšenie belly cargo prepravy. V návrhovej časti sú odporúčané opatrenia ako digitalizácia dokumentácie, zverejňovanie voľných kapacít v reálnom čase a zlepšenie koordinácie subjektov. Navrhované riešenia podporujú efektívnejšie využitie kapacít, znižovanie nákladov a zvýšenie konkurencieschopnosti kombinovanej leteckej dopravy.

Keywords

Belly cargo, air cargo transport, dangerous goods, ULD

1. Úvod

Letecká nákladná doprava zohráva dôležitú úlohu v globálnom obchode vďaka svojej rýchlosti, efektívnosti a celosvetovej dostupnosti. Významným segmentom je kombinovaná doprava, kde sa náklad prepravuje v batožinových priestoroch osobných lietadiel. Tento model ponúka flexibilitu, ekonomickú výhodnosť a možnosť konsolidácie zásielok, čím sa stáva vhodnou alternatívou k výlučne nákladnej preprave.

Analýza údajov z Letiska Košice hodnotí voľnú hmotnosť lietadiel pri odlete v súvislosti s počtom pasažierov a objemom prepravovaného nákladu. Výsledky poukazujú na rezervy v efektívnom využívaní nákladných priestorov a potrebu lepšej koordinácie logistických procesov.

Navrhované opatrenia zahŕňajú digitalizáciu prepravných dokumentov, zavedenie integrovaného komunikačného systému medzi letiskovým terminálom a handlingovými pracovníkmi a vytvorenie online platformy na monitoring dostupnosti nákladových kapacít. Riešenia sú koncipované tak, aby boli aplikovateľné aj na ďalšie letiská.

2. Charakteristika štruktúry leteckej nákladnej dopravy

Letecký nákladný priemysel je zásadným sprostredkovateľom svetového obchodu, pričom tovar prepravovaný letecky predstavuje až 36 % hodnoty globálne obchodovaného tovaru. Systém leteckej nákladnej dopravy je navrhnutý tak, aby spĺňal požiadavky moderného trhu, kde rýchlosť a spoľahlivosť zohrávajú kľúčovú úlohu. Táto forma prepravy poskytuje efektívny prístup na globálne trhy, čo významne prispieva k medzinárodnému obchodovaniu a hospodárskemu rastu [1].

2.1. Typy leteckých spoločností poskytujúcich služby leteckej

Preprava nákladu prostredníctvom leteckej dopravy je v súčasnosti poskytovaná nielen leteckými spoločnosťami zameranými výhradne na nákladnú dopravu ale aj dopravcami, ktorí poskytujú možnosť prepravy tovaru ako dokládku v nákladových priestoroch osobných lietadiel. Rôzne možnosti prepravy prinášajú flexibilitu, ktorá zaručuje uspokojenie širokého spektra potrieb zákazníkov [2].

2.1.1. Nákladní leteckí dopravcovia

Nákladný dopravca je letecká spoločnosť špecializujúca sa na prepravu tovaru a nie cestujúcich. Títo dopravcovia využívajú flotilu nákladných lietadiel alebo prestavaných osobných lietadiel, optimalizovaných na efektívnu prepravu. Zohrávajú kľúčovú úlohu v nákladnej doprave a logistike a je preferovanou voľbou pre rýchlu a nákladovo efektívnu prepravu [2].

Nákladné lietadlá umožňujú prepravu väčších zásielok než osobné lietadlá. Výška nákladu na hlavnej palube môže dosiahnuť až 300 cm, kým v osobných lietadlách je obmedzená na približne 160 cm. Táto kapacitná výhoda pramení zo špecifickej úpravy interiéru, kde je priestor plne prispôsobený pre náklad [3].

Integrovaní nákladní leteckí dopravcovia

Integrovaný dopravca je letecká prepravná spoločnosť, ktorá zabezpečuje široké spektrum služieb, ako sú letecká preprava, pozemná preprava, skladovanie, manipulácia so zásielkami, a ich konečné doručenie, čím ponúka komplexné riešenie prepravy „od dverí k dverám“. Táto kombinácia umožňuje odosielateľom efektívne prepraviť svoj tovar bez potreby koordinácie viacerých zásielok cez rôznych dopravcov. Medzi

najvýznamnejších integrovaných expresných dopravcov patria spoločnosti FedEx, UPS a DHL [4].

Keďže všetky služby poskytované integrovaným dopravcom sú v jeho vlastnej réžii, môže ponúknuť konkurenčne výhodné ceny a vyššiu úroveň služieb v porovnaní s riešením so spoluprácou viacerých nezávislých dopravcov [4].

Neintegrování nákladní leteckí dopravcovia

Neintegrovaná nákladná letecká spoločnosť je špecializovaný dopravca, ktorý sa venuje výhradne preprave nákladu medzi letiskami bez poskytovania komplexných logistických riešení. Tento typ dopravcu sa odlišuje od integrovaných dopravcov tým, že jeho činnosť je obmedzená len na letecký segment prepravy, zatiaľ čo integrovaní dopravcovia zabezpečujú celý dodávateľský reťazec. Neintegrování dopravcovia zvyčajne úzko spolupracujú so zasielateľmi alebo tretími stranami, ktoré poskytujú logistické služby potrebné na zabezpečenie celého prepravného procesu [5].

2.1.2. Kombinovaní leteckí dopravcovia

Väčšina osobných leteckých spoločností prepravuje náklad v podpalubných nákladných priestoroch. Najpreferovanejšími typmi nákladných lietadiel prevádzkovaných kombinovanými leteckými spoločnosťami pre osobnú a nákladnú dopravu sú veľkokapacitné a širokotrupé lietadlá s dlhým doletom. V porovnaní s integrovanými leteckými spoločnosťami majú kombinované osobné a nákladné letecké spoločnosti alebo ich plne vlastnené dcérske spoločnosti zaoberajúce sa nákladom (napr. Emirates SkyCargo, Lufthansa Cargo, Singapore Airlines Cargo) oveľa menšie flotily nákladných lietadiel. Preprava nákladu v podpalubných priestoroch môže dopĺňať služby pre cestujúcich a z inak nerentabilnej linky môže urobiť udržateľnú [6].

Preprava nákladu v podpalubnom nákladovom priestore lietadiel

Pri spôsobe prepravy nákladu v podpalubnom nákladovom priestore lietadiel sa lietadlá využívajú dvojúčelovo. Takýto prístup k preprave nákladu umožňuje efektívnejšie využívanie zdrojov a pomáha kompenzovať náklady spojené s prevádzkou týchto lietadiel [7, 8].

Podpalubný nákladný priestor sa nachádza pod hlavnou palubou lietadla a zvyčajne je prístupný samostatnými tzv. cargo dverami. Je špeciálne navrhnutý na prepravu rôznych druhov nákladu, od malých balíkov až po väčšie predmety uložené na paletách, prípadne v špeciálnych leteckých kontajneroch. Priestor je vybavený špecializovaným zariadením, ako sú nákladné siete, popruhy a upínací systém pre palety a kontajnery, aby sa zabezpečila bezpečná preprava tovaru [7, 8].

Množstvo nákladu prepraveného v nákladových priestoroch dopravných lietadiel závisí od dopytu po osobnej leteckej doprave. Keďže náklad sa prepravuje v rovnakých lietadlách, ktoré primárne slúžia aj na prepravu cestujúcich, množstvo dostupnej kapacity na prepravu nákladu je priamo ovplyvnené tým, ako často a kam lietadlá lietajú. Pre týchto dopravcov je nevýhodou, že ich kapacita pre náklad je fixná [7, 8].

Ak je dopyt po osobnej leteckej doprave vysoký, lietadlá lietajú častejšie a na rôznych trasách, čo zvyšuje dostupnú kapacitu pre belly cargo. Naopak, ak je dopyt po osobnej doprave nízky, znižuje sa frekvencia letov a tým aj kapacita pre prepravu nákladu [7, 8].

Preprava nákladu kombinovanými lietadlami

Kombinované lietadlá sú určené na prepravu cestujúcich aj nákladu v tom istom lietadle. Zvyčajne má predelený interiér, ktorý oddeľuje nákladný priestor od kabíny pre cestujúcich. Lietadlá sú tiež vybavené veľkými nákladnými dverami na bokoch trupu, ktoré umožňujú rýchle nakladanie a vykladanie nákladných kontajnerov alebo paliet. Táto konfigurácia umožňuje súčasnú prepravu cestujúcich a nákladu počas jedného letu. Pri úzkotrupých lietadlách sa nákladný priestor zvyčajne nachádza v zadnej časti lietadla, zatiaľ čo kabína pre cestujúcich je umiestnená v prednej časti. V prípade využitia širokotrupých lietadiel je rozdelenie priestorov pre náklad a pasažierov horizontálne. Takýmto rozdelením vznikne horná paluba, ktorá slúži cestujúcim a nákladové priestory, kde je uložená batožina a náklad [9].

Najmä úzkotrupé lietadlá sú bežne používané leteckými spoločnosťami, ktoré prevádzkujú linky, na ktorých je dopyt po osobnej aj nákladnej doprave dlhodobou rovnaký. Ide predovšetkým o regióny s nízkym počtom cestujúcich, ale so značným dopytom po náklade, ako sú arktické oblasti, malé ostrovné štáty alebo rozvojové ekonomiky. Často sa využívajú aj na trasách do vzdialených alebo menej obývaných oblastí, kde nemusí byť dostatočný dopyt po samostatných osobných a nákladných letoch. Kombináciou týchto dvoch spôsobov môžu letecké spoločnosti maximalizovať využitie lietadla a ponúknuť väčšiu flexibilitu pri svojej prevádzke [9].

2.2. Typy tovaru prepravovaného leteckou nákladnou dopravou

Výber leteckej dopravy pre určité produkty určujú dva hlavné faktory a to hodnota tovaru a rýchlosť, akou sa musí prepraviť. Leteckou nákladnou dopravou sa zvyčajne prepravujú naliehavé materiály, ako napríklad liečivá na lekársku diagnostiku alebo liečbu, alebo tovar vysokej hodnoty, ako napríklad technologické výrobky a komodity vysokej hodnoty. Letecká preprava je ideálna aj pre niektoré potravinárske výrobky, ako sú čerstvé ryby, exotické ovocie a rezané kvety. Rast dopytu po preprave farmaceutických výrobkov a výrobkov zdravotnej starostlivosti viedol aj k zavedeniu nových predpisov týkajúcich sa správneho zaobchádzania so zásielkami citlivými na čas a teplotu [12].

2.2.1. Špeciálny náklad

Do leteckej nákladnej prepravy môže byť prijatý aj tovar, ktorý má vzhľadom na svoju povahu, hmotnosť, rozmery či hodnotu špecifické požiadavky vrátane balenia, označovania, dokumentácie a manipulácie v prepravnom reťazci. Preprava tohto tovaru sa rieši prostredníctvom osobitných predpisov, ktoré sa musia dodržiavať pri príprave, ponuke, preberaní a manipulácii s týmto nákladom. Ide o tzv. špeciálny tovar, medzi ktorý patrí okrem iného nebezpečný tovar, živé zvieratá, náklad podliehajúci skaze a výrobky citlivé na čas a teplotu [12].

2.3. Zariadenia na zabezpečenie leteckého nákladu

Na uloženie, zoskupovanie a upevňovanie nákladu, pošty a batožiny na účely leteckej dopravy slúžia špeciálne jednotkové nákladné zariadenia tzv. ULD. ULD predstavuje pevný kontajner alebo paletu so sieťovinou či pletivom na zabezpečenie požadovaného obsahu. V prípade využívania zariadení tohto typu je potrebné, aby bol nákladný priestor lietadla vybavený valčekovou podlahou, popruhmi a príslušenstvom potrebným na upevnenie kontajnerov alebo paliet v danej polohe. V súčasnosti existuje niekoľko rôznych typov a veľkostí ULD navrhnutých tak, aby sa zmestili do priestorov rôznych typov lietadiel [7].

Počas letu plnia ULD kľúčovú úlohu pri zabezpečení nákladu v batožinovom priestore, čím sa eliminuje riziko jeho nekontrolovaného pohybu, ktorý by mohol spôsobiť poškodenie lietadla alebo samotného prepravovaného tovaru. Okrem ochrany nákladu prispievajú tieto zariadenia aj k správne rozloženiu hmotnosti v lietadle, čím sa zachováva aerodynamická stabilita a optimálne vyváženie počas celého letu [7].

2.3.1. Typy jednotkových nákladných zariadení

Jednoduchším typom nákladných zariadení sú prepravné palety. Konštrukcia paliet je navrhnutá tak, aby spĺňala vysoké požiadavky na pevnosť a odolnosť pri čo najnižšej možnej hmotnosti. Na tento účel sa používajú materiály ako odolný plast alebo hliník, ktoré zabezpečujú optimálny pomer medzi pevnosťou a hmotnosťou. Na zaistenie nákladu počas prepravy je každá paleta vybavená prídavnou sieťou, ktorá zabraňuje jeho pohybu a znižuje riziko poškodenia. Cieľom tejto koncepcie je minimalizovať dodatočnú hmotnosť palety tak, aby neovplyvňovala celkové vyváženie lietadla a jeho letové vlastnosti [8, 9, 10].

V medzinárodnej leteckej nákladnej doprave je celosvetovo používaným typom nákladného zariadenia kontajner. Nákladné kontajnery používané v leteckej doprave sú najčastejšie vyrábané z hliníka alebo sklolaminátu. Tvar prepravných kontajnerov je precízne navrhnutý tak, aby kopíroval aerodynamické krivky nákladného priestoru lietadla, čím sa zabezpečuje maximálna efektivita využitia dostupného priestoru a optimalizuje rozloženie nákladu. V porovnaní s prepravnými paletami zabezpečujú kontajnery vyššiu ochranu nákladu, umožňujú lepšiu organizáciu priestoru a znižujú riziko možného poškodenia prepravovaného nákladu a súčasne aj poškodenia vnútorných nákladných priestorov lietadla [8, 9, 10].

2.3.2. Označovanie a certifikácia jednotlivých nákladných zariadení

Na zachovanie a správne fungovanie logistických procesov a dohľadu nad zásielkou je nevyhnutné značenie nákladných jednotiek. Označovanie ULD je štandardizované podľa medzinárodných noriem stanovených Medzinárodnou asociáciou leteckých dopravcov, čo umožňuje jednoduchú identifikáciu, sledovanie a efektívne riadenie logistických operácií na celosvetovej úrovni. Základom každého označenia ULD je 10 znakov, ktoré sú kombináciou písmen a čísl s tromi hlavnými časťami, ktoré slúžia na definovanie potrebných charakteristík daného ULD. Prvé tri písmená sa používajú na

definovanie typu ULD a jeho špecifikácie. Prvý znak definuje hlavný typ jednotky, druhý označuje rozmery a tvar a tretí znak špecifikuje vlastnosti ako sú napr. chladiace systémy. Ďalších päť čísl je zvyčajne jedinečné sériové číslo leteckej spoločnosti pre dané ULD, ktoré ho odlišuje od ostatných zariadení rovnakého typu. Posledné dva znaky sú kódom IATA leteckej spoločnosti. Pri správnom fungovaní systému by sa tento 10-miestny kód nemal nikdy duplikovať a každé ULD, ktoré je v obehu, by malo mať jedinečný kód [11].

3. Metodika a metódy skúmania

Kapitola definuje ciele a metodiku riešenia optimalizácie logistických a technických procesov v kombinovanej leteckej doprave s cieľom efektívnejšieho využívania nákladných priestorov osobných lietadiel.

Čiastkové ciele zahŕňajú analýzu štruktúry dopravcov, typov nákladu, faktorov ovplyvňujúcich dopyt, spracovanie štatistických údajov z Letiska Košice, identifikáciu hrozieb pri implementácii zmien a tvorbu optimalizačných návrhov.

Použitá metodika pozostáva zo syntézy údajov zo zahraničných zdrojov, štatistickej analýzy reálnych dát o preprave, komparácie výsledkov a analýzy rizík zavádzania nových postupov. Výsledkom je identifikácia hlavných limitujúcich faktorov a návrh opatrení na zvýšenie efektivity procesov v oblasti belly cargo.

4. Analýza prepravy nákladu kombinovanými leteckými dopravcami

Analytická časť štúdie je zameraná na charakteristiku prepravy nákladu formou dokládky do podpalubných priestorov osobných lietadiel na pravidelných letových linkách na vybraných letiskách na Slovensku. Štúdia sa zameriava aj na niekoľko faktorov ako sezónnosť, konkurencieschopnosť a colné a administratívne procesy, ktoré majú najväčší dopad na kombinovaných leteckých dopravcom a konečné množstvá prepraveného nákladu formou dokládky do nákladných priestorov osobných lietadiel.

4.1. Zhodnotenie prepravy nákladu na vybraných letiskách na Slovensku

V rámci praktickej štúdie sme spracovali štatistické dáta z nami vybraného letiska a to konkrétne Letiska Košice. Na základe získaných údajov analyzujeme vývoj leteckej nákladnej dopravy na daných letiskách v priebehu niekoľkých rokov. Taktiež určíme ako mohlo byť množstvo prepraveného nákladu ovplyvnené faktormi ako sú sezónnosť, konkurencieschopnosť a colné a administratívne procesy. V závere vykonáme komparáciu výsledkov na jednotlivých letiskách v rámci nami posudzovaných rokov ale aj letísk ako takých.

4.1.1. Letisko Košice

Na základe údajov, ktoré nám boli poskytnuté Letiskom Košice sme vypracovali štatistiku, ktorá vypovedá o množstvách a hmotnostiach prepraveného tovaru v podpalubných priestoroch lietadiel prepravujúcich pasažierov. V štatistike sme spracovávali dáta výlučne týkajúce sa letov pravidelných liniek, či už dopravcov s nízkonákladovým alebo tradičným modelom

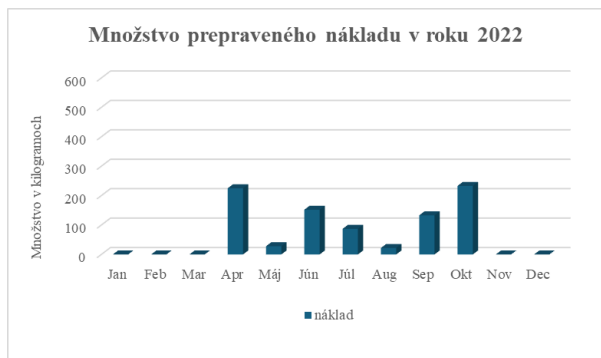
podnikania. Do úvahy sme brali lety nie len odlietajúce z letiska ale aj prilietajúce na letisko. Analýza štatistických informácií bola vykonaná za obdobie troch rokov a to 2022, 2023 a 2024 separátne za každý mesiac daného roku.

Prehľad celkového počtu prepravených pasažierov a množstva nákladu v sledovanom období



Graf znázornenia počtu prepravených pasažierov v jednotlivých mesiacoch roku 2022

Počet prepravených pasažierov bol najvyšší v mesiaci august a následne v troch predchádzajúcich mesiacoch. Naopak pokles počtu cestujúcich nastal v mesiacoch január a marec, čo je bežný jav v preprave pasažierov zapríčinený sezónnosťou. Sezónnosť spôsobuje, že najväčší nárast objemov cestujúcich nastáva práve počas hlavnej sezóny, ktorá trvá od júna do septembra a následne dopyt po osobnej leteckej doprave klesá. Rovnako mohla byť nízka miera prepravených pasažierov v prvých mesiacoch roku odzrkadlením v tom čase už zanikajúcich vplyvov pandémie COVIDu-19.



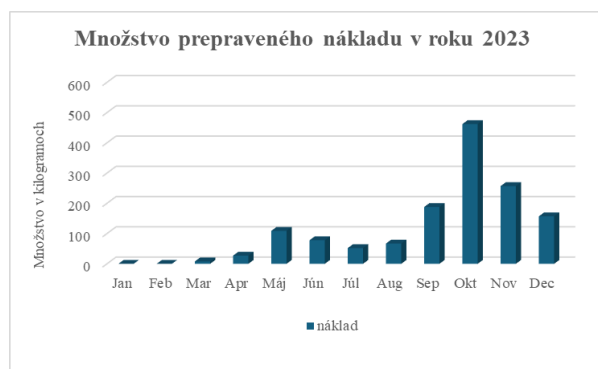
Graf znázornenia množstva prepraveného nákladu v jednotlivých mesiacoch roku 2022

Graf ukazuje, že najviac nákladu v podpalubných priestoroch osobných lietadiel bolo prepraveného v apríli a októbri 2022, pričom preprava prebiehala výlučne od apríla do októbra. V tomto období zároveň stúpol počet pasažierov, čo naznačuje, že letecké spoločnosti nasadzovali väčšie lietadlá alebo zvyšovali frekvenciu letov, čím vznikla voľná kapacita využitá na náklad. V zimných mesiacoch nebola zaznamenaná žiadna preprava nákladu, pravdepodobne v dôsledku nižšieho dopytu alebo redukcie liniek.



Graf znázornenia počtu prepravených pasažierov v jednotlivých mesiacoch roku 2023

Počet prepravených pasažierov na letisku Košice v roku 2023 bol medzi mesiacmi vyrovnanější, pričom najvyššie počty boli zaznamenané v apríli, máji a októbri. V hlavnej letnej sezóne došlo k miernemu poklesu, pravdepodobne v dôsledku zvýšeného využívania charterových letov. Najnižšie počty cestujúcich boli zaznamenané počas zimy, keď je dopyt po leteckej doprave tradične nižší.



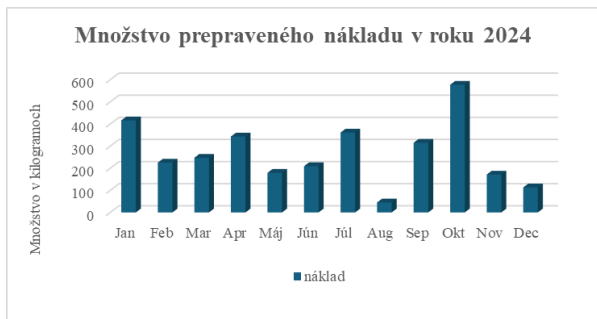
Graf znázornenia množstva prepraveného nákladu v jednotlivých mesiacoch roku 2023

V roku 2023 boli objemy prepraveného nákladu najvyššie v posledných mesiacoch roka, pričom v októbri bol zaznamenaný výrazný nárast, pravdepodobne v súvislosti s vianočnou sezónou. Vrchol v preprave nákladu aj pasažierov v októbri naznačuje, že vyššia frekvencia letov umožnila prepraviť väčšie množstvo nákladu. Naopak, v mesiacoch január až marec boli objemy prepravy minimálne, čo korešponduje s nízkym počtom pasažierov.



Graf znázornenia počtu prepravených pasažierov v jednotlivých mesiacoch roku 2024

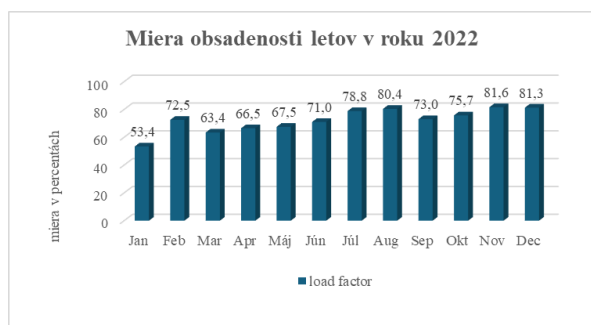
V roku 2024 počet prepravených pasažierov rástol až do septembra, po ktorom nasledoval mierny pokles. Najvyššie objemy boli dosiahnuté v letných mesiacoch, najnižšie vo februári. Tento vývoj odráža sezónne výkyvy dopytu, pričom rozdiely medzi jednotlivými mesiacmi boli v porovnaní s predchádzajúcimi rokmi menej výrazné.



Graf znázornenia množstva prepraveného nákladu v jednotlivých mesiacoch roku 2024

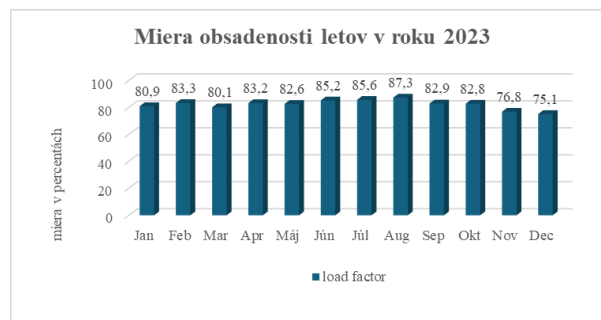
Vývoj množstva prepraveného nákladu na letisku Košice v roku 2024 sa výrazne odlišoval od predchádzajúcich rokov, pričom najvyššie hodnoty boli opäť dosiahnuté v októbri. Vyššie objemy boli zaznamenané aj v januári, apríli a júli, pravdepodobne v dôsledku zvýšenej logistiky po vianočnom období. Naopak, v auguste došlo k poklesu, čo môže súvisieť s nasadzovaním väčších lietadiel pre cestujúcich a vyvažovaním nákladnej kapacity medzi nákladnými a kombinovanými letmi.

Zhodnotenie množstva prepraveného nákladu z hľadiska obsadenosti letov pasažiermi



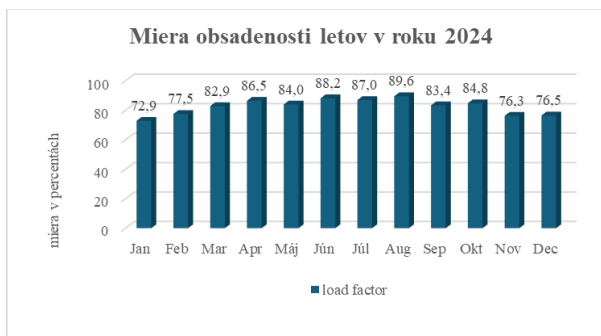
Graf znázornenia miery obsadenosti letov pasažiermi v jednotlivých mesiacoch roku 2022

V roku 2022 bola najvyššia priemerná obsadenosť lietadiel zaznamenaná v novembri, decembri a auguste. V zimných mesiacoch to súviselo s nárastom cestujúcich typu VFR (návštevy priateľov a rodiny), v lete s vysokým dopytom po dovolenkových letoch. Najnižšiu obsadenosť lietadiel, 53,4 %, vykázal január, čo odráža slabý dopyt a znížené frekvencie letov typické pre toto obdobie.



Graf znázornenia miery obsadenosti letov pasažiermi v jednotlivých mesiacoch roku 2023

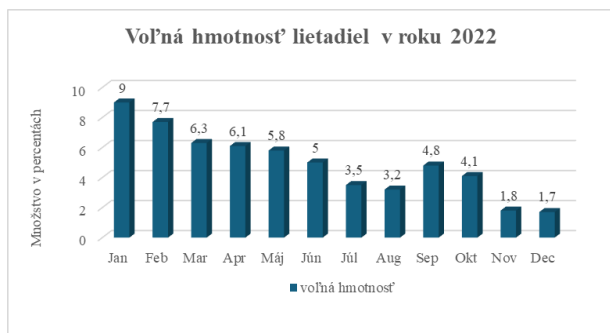
V roku 2023 sa hodnoty miery obsadenosti letov pasažiermi v jednotlivých mesiacoch pohybovali na podobnej úrovni. Napriek tomu, že počet cestujúcich bol v počiatočných mesiacoch roku 2024 nižší, tento fakt sa neodrzakadlil na obsadenosti letov. Hodnoty load faktora v tomto období dokonca porovnateľné s hlavnou letovou sezónou, kedy bola obsadenosť lietadiel veľmi vysoká. K menším odchýlkam došlo v posledných dvoch mesiacoch roka, kedy došlo k miernemu poklesu load faktora. Tento pokles môžeme pripísať sezónnym faktorom ako sú rastúce ceny leteniek v období sviatkov alebo naopak mimosezónnemu obdobiu, kedy má dopyt po využití leteckej dopravy klesajúci charakter.



Graf znázornenia miery obsadenosti letov pasažiermi v jednotlivých mesiacoch roku 2024

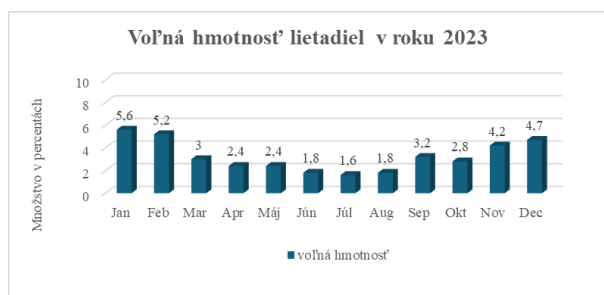
V roku 2024 mali hodnoty obsadenosti letov pasažiermi veľmi podobný priebeh ako tomu bolo v prípade grafu počtu prepravených cestujúcich. Najvyšší load faktor bol zaznamenaný v období letnej sezóny, kedy leteckú dopravu využil najväčší počet cestujúcich. Obsadenosť letov dosahovala najnižšie hodnoty v počiatočných a záverečných mesiacoch roka. Pre túto fázu roka je však charakteristické, že sa ukazovatele vyznačujú práve takýmto priebehom.

Zhodnotenie množstva prepraveného nákladu z hľadiska voľnej hmotnosti lietadiel vo vzťahu k maximálnej vzletovej hmotnosti lietadiel



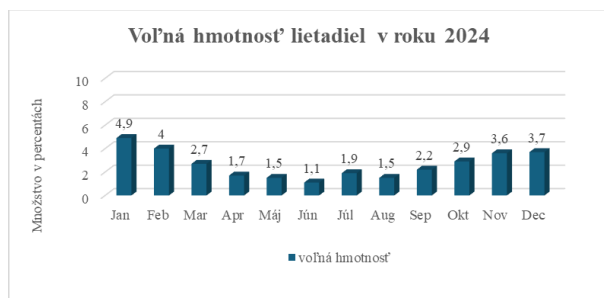
Graf znázornenia voľnej hmotnosti lietadiel v čase odletu v jednotlivých mesiacoch roku 2022

V roku 2022 dosahovala voľná hmotnosť lietadiel priemernú hodnotu 4,9 %, čo predstavovalo približne 3 466 kg na let. Najvyššia voľná hmotnosť 9 % bola zaznamenaná v januári, pričom v ďalších mesiacoch postupne klesala vďaka vyššej obsadenosti, najmä počas leta. V septembri a októbri síce stúplo množstvo prepraveného tovaru a pasažierov, no obsadenosť mierne klesla, pravdepodobne v dôsledku nasadenia väčších lietadiel s vyššou kapacitou, čo aj pri vyššej preprave generovalo voľnú hmotnosť.



Graf znázornenia voľnej hmotnosti lietadiel v čase odletu v jednotlivých mesiacoch roku 2023

V roku 2023 sa voľná hmotnosť lietadiel znížila na priemer 3,2 % (približne 1 827 kg na let). Jej vývoj mal parabolický priebeh – najvyššie hodnoty boli na začiatku a konci roka, najnižšie medzi marcom a októbrom. Lety z letiska Košice si udržiavali vysoký load faktor aj pri nižšom počte cestujúcich v niektorých mesiacoch. Voľná hmotnosť sa viac odvíjala od množstva nákladu a v novembri a decembri ju ovplyvnil aj mierny pokles obsadenosti pasažiermi.



Graf znázornenia voľnej hmotnosti lietadiel v čase odletu v jednotlivých mesiacoch roku 2024

V roku 2024 podobne ako aj v predchádzajúcom roku boli hodnoty voľnej hmotnosti spočiatku klesajúci a následne stúpajúci charakter. V priemere sa jednalo o 2,6 % z celkovej možnej hmotnosti lietadiel pri odlete, čo predstavuje približne 1 596 kilogramov voľnej hmotnosti na jednom lete. Najvyššie hodnoty boli dosiahnuté v počiatočných mesiacoch roka, čo bolo pravdepodobne spôsobené nízkym počtom cestujúcich a nižšou mierou obsadenosti letov pasažiermi. Podobne tomu tak bolo aj v mesiacoch november a december. Naopak, veľmi nízka miera voľnej hmotnosti lietadiel v čase odletu bola zaznamenaná v období máj – september, čomu zodpovedajú veľké objemy prepravených pasažierov a vysoká miera obsadenosti jednotlivých letov v danom období.

5. Výsledky

Po preskúmaní a vyhodnotení parametrov ako počet prepravených pasažierov, množstvo prepraveného nákladu, miera obsadenosti letov pasažiermi a voľná hmotnosť lietadiel na letisku Košice v sledovanom období rokov 2022, 2023 a 2024 sme prišli k nasledovným zisteniam. Letisko Košice sa venuje preprave nákladu formou doklady do podpalubia osobných lietadiel, avšak len prípadne tradičných leteckých dopravcov. Významným prepravcom nákladu touto formou je letecká spoločnosť LOT Polish Airlines. V roku 2024 a to výhradne v mesiaci október sme zaznamenali aj prepravu nákladu leteckou spoločnosťou Austrian Airlines. Naopak, nízkonákladoví leteckí dopravcovia sa nijakým spôsobom nepodieľali na preprave nákladu. Predpokladáme, že dôvodom neposkytovania služieb tohto typu je uprednostnenie maximálneho využitia lietadiel v prevádzke a krátkych otočkových časov lietadiel. Zavedenie zložitejších systémov do prevádzky by nízkonákladovým leteckým dopravcom mohlo spôsobiť prevádzkové komplikácie alebo meškania. Objemy prepraveného nákladu vzrástli ročne v priemere 1,8-krát a počet prepravených pasažierov 1,2-krát. Miera obsadenosti letov v priebehu rokov dosahovala veľmi podobné hodnoty. Výnimkou je však prvá polovica roku 2022, kedy miera obsadenosti dosahovala v porovnaní so zvyškom roka nižšie hodnoty. Voľná hmotnosť lietadiel v čase odletu mala v priebehu daných rokov klesajúci charakter. Táto skutočnosť značí, že obsadenosť a naplnenosť lietadiel sa čoraz viac zvyšuje a približuje k optimálnym hodnotám. V priebehu sledovaného obdobia došlo k poklesu voľnej kapacity lietadiel na jednotlivých letoch v priemere o viac ako 1 % čo predstavuje približne 1 000 kilogramov.

Medzi najrelevantnejšie dôvody, pre ktoré nedochádza k maximálnej vyťaženosti kapacít nákladových priestorov lietadiel prepravujúcich ako náklad tak pasažierov patrí časová náročnosť procesov spojených s vykládkou, nakládkou a kontrolou nákladu. Leteckých dopravcov odrádza najmä fakt, že v im dané lietadlo generuje náklady z dôvodu dlhších otočkových časov, letiskových poplatkov a momentálnej nevyužitelnosti lietadla. Aj napriek dodatočným výnosom, ktoré im takáto služba dokáže vytvoriť je pre niektoré typy leteckých dopravcov ako sú nízkonákladoví leteckí dopravcovia prioritou maximálne vyťaženie lietadiel počas dňa, čo je častokrát v rozpore s maximalizáciou využitia dostupných kapacít nákladových priestorov lietadiel.

6. Návrh optimalizácie technických a logistických procesov

V tejto časti štúdie je predstavený návrh optimalizácie procesov na zvýšenie vyťaženia nákladových priestorov lietadiel prepravujúcich pasažierov a zatraktívnenie prepravy nákladu pre dopravcov, ktorí tieto služby zatiaľ neposkytujú. Návrh vychádza z analýzy údajov o preprave nákladu cez belly cargo na letisku Košice a obsahuje odporúčania založené na získaných poznatkoch.

6.1. Digitalizácia nákladovej a colnej dokumentácie

Jedným z hlavných problémov v oblasti leteckej prepravy nákladu je nedostatok vopred poskytnutých informácií o prepravovanom tovare. Ich skorá dostupnosť by poskytovateľom handlingových služieb umožnila efektívnejšie plánovať logistiku ako napríklad určiť potrebný počet pracovníkov, pripraviť vhodné technické vybavenie na manipuláciu so špeciálnymi typmi nákladu a zabezpečiť dostatočné skladové kapacity, čím by sa predišlo preplneniu skladov a poškodeniu tovaru. Zároveň by včasné sprístupnenie prepravných dokumentov umožnilo rýchlejšie colné konanie a lepšiu koordináciu celého logistického reťazca. Kľúčom k dosiahnutiu týchto benefitov je úplná digitalizácia dokumentácie (nákladový list, faktúra, baliaci list, colné a bezpečnostné dokumenty). Digitalizácia zabezpečí synchronizáciu medzi leteckými dopravcami, letiskami a colnými úradmi, čím sa zrýchlia a zefektívnia logistické procesy, ktoré doposiaľ predstavovali prekážku pre širšie využívanie nákladových priestorov osobných lietadiel na prepravu tovaru.

6.2. Zlepšenie koordinácie medzi terminálom pre pasažierov a poskytovateľmi služieb pozemnej obsluhy

Koordináciu medzi terminálom pre pasažierov a poskytovateľom pozemnej obsluhy pri preprave nákladu zabezpečuje dispečing, ktorý riadi celý proces odbavenia lietadla. Napriek digitálnym systémom existujú medzery, najmä v prepojení s pracovníkmi terminálu, čo vedie k nedostatku informácií o nakládke a vykládke nákladu a môže spôsobiť časové straty. Zavedenie integrovaného systému so zdieľaným prístupom by umožnilo lepšiu koordináciu medzi všetkými zložkami a eliminovalo by prestoje spôsobené čakaním na pokyny. Nastavením časových okien a limitov pre jednotlivé úkony by bolo možné znížiť oneskorenia a systém by v prípade meškania automaticky upozornil dispečing aj personál pri bráne. Takýto prístup by zlepšil plynulosť, predvídateľnosť a efektívnosť odbavenia lietadiel pri kombinovanej preprave nákladu a cestujúcich.

6.3. Zverejňovanie dostupných kapacít nákladových priestorov lietadiel v reálnom čase

Nízke využitie nákladových priestorov osobných lietadiel často spôsobuje nedostatočná dostupnosť informácií o voľnej kapacite. Aktuálne zasielateľia zisťujú možnosti prepravy manuálne kontaktovaním cargo oddelení dopravcov, čo je neefektívne a časovo náročné. Tento problém by riešil digitálny systém umožňujúci v reálnom čase vyhľadávať, porovnávať a rezervovať dostupnú belly cargo kapacitu podľa letov, cien a špecifických požiadaviek na náklad. Zavedenie takéhoto

systému by zvýšilo dostupnosť služby, skrátilo čas plánovania, zefektívnilo využívanie kapacít a zlepšilo tok informácií v logistickom reťazci.

7. Záver

Cieľom štúdie bolo vytvoriť návrh optimalizácie logistických a technických procesov v kombinovanej leteckej doprave so zameraním na efektívnejšie využitie voľnej kapacity v nákladových priestoroch osobných lietadiel (tzv. belly cargo). Úvodná časť sa venovala prehľadu leteckej nákladnej dopravy, charakteristike prepravovaného tovaru a súvisiacim logistickým procesom. V analytickej časti boli spracované faktory ovplyvňujúce množstvo belly cargo nákladu, vrátane sezónnosti, konkurencieschopnosti a administratívnych postupov. Praktická časť štúdie využila štatistické dáta z Letiska Košice z rokov 2022–2024, pričom sa analyzovali ukazovatele ako počet cestujúcich, objem nákladu, miera obsadenosti letov a voľná hmotnosť lietadiel. Výsledky poukázali na sezónne výkyvy a identifikovali potenciál pre optimalizáciu nákladnej prepravy.

Na základe týchto zistení boli spracované odporúčania vrátane digitalizácie nákladnej a colnej dokumentácie pre efektívnejšie plánovanie manipulácie s nákladom, zavedenia integrovaného komunikačného systému medzi terminálom a pozemnou obsluhou, a zverejňovania aktuálnej dostupnosti nákladových kapacít na pravidelných linkách.

Štúdia prináša teoretický aj praktický prínos, pričom navrhované riešenia sú aplikovateľné na slovenských aj zahraničných letiskách. Napriek spracovaniu dát z jedného letiska je metodika univerzálne využiteľná a otvára priestor pre ďalší výskum v oblasti digitalizácie a integrácie prepravných systémov v kombinovanej doprave. Navrhnuté opatrenia podporujú udržateľnejšiu a efektívnejšiu leteckú nákladnú dopravu.

Referencie

1. Inbound Logistics (2023). 9 Types of Cargo: A Guide To Transporting Goods by Plane. Online. Dostupné na: <https://www.inboundlogistics.com/articles/types-of-air-cargo/> [citované 2024-11-3].
2. SCM EDU (bez dáta). All-Cargo Carrier. Online. Dostupné na: <https://scmedu.org/allcargocarrier/> [citované 2025-1-24].
3. Karl Gross (bez dáta). Which transport options are available for international shipping via air freight and which points need to be paid attention to? Online. Dostupné na: <https://www.karlgross.de/en/specializations/belly-freight-or-freighter> [citované 2024-11-3].
4. SCM EDU (bez dáta). Integrated Carrier. Online. Dostupné na: <https://scmedu.org/integratedcarrier/> [citované 2025-1-24].
5. ACRP WebResources (bez dáta). The Players in the Air Cargo Industry. Online. Dostupné na: <https://crp.trb.org/acrpwebresource1/the-players-in-the-air-cargo-industry/> [citované 2025-1-24].
6. HUANG, Ethan (2018). Types of Air Transportation. Online. Dostupné na: <https://www.morethanshipping.com/types-air-transportation/> [citované 2025-1-25].

7. HAYWARD, Justin (2022). Everything You Ever Wanted To Know About ULDs. Online. Dostupné na: <https://simpleflying.com/everything-you-ever-wanted-to-know-about-ulds/> [citované 2025-2-3].

8. BAJAJ, Sahil (2024). Air Cargo Pallets: Types, Benefits & Common Mistakes. Online. Dostupné na: <https://www.shiprocket.in/blog/air-cargo-pallets/> [citované 2025-2-3].

9. SKYbrary (bez data). Unit Load Devices (ULD). Online. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/unit-load-devices-uld> [citované 2025-2-3].

10. IATA (2021). What is Aircraft ULD in Air Transport? Online. Dostupné na: <https://www.iata.org/en/publications/newsletters/iata-knowledge-hub/what-is-aircraft-uld-in-air-transport/> [citované 2025-2-3].

11. ULD CARE (bez data). ULD Identification Codes demystified. Online. Dostupné na: <https://www.uldcare.com/articles/library/care/uld-identification-codes-demystified/> [citované 2025-2-3].



SPOLEČENSKÁ ZODPOVĚDNOST EVROPSKÝCH LETECKÝCH SPOLEČNOSTÍ V POST-COVIDOVÉM OBDOBÍ

Aneta Maintoková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Anna Tomová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article deals with the issue of corporate social responsibility of European airline companies. The main objective of the article is to analyze the approaches between traditional and low-cost carriers, focusing on the period before the pandemic, during and after the COVID-19 pandemic. The article focuses on a qualitative evaluation of the annual reports of twenty selected European companies. The research showed that traditional airline companies pay more attention to individual aspects of corporate responsibility and focus on all their areas from environmental initiatives to social and ethical efforts. In contrast, low-cost airline companies primarily focus on ecological efficiency and the reduction of emissions with the aim of cost optimization. The COVID-19 pandemic affected both spectrum and content of CSR activities, which were limited during the crisis period. After the pandemic, airline companies are once again placing greater emphasis on corporate social responsibility in their strategies. The article demonstrates that corporate social responsibility is no longer just a tool for improving the image of airline companies but is becoming a strategic part of their management. The conclusions of the article may contribute to a deeper understanding of the ways in which CSR can enhance the competitiveness of airline companies.

Keywords

CSR, COVID-19 pandemic, Low-cost airlines, Traditional airlines, European airlines

1. Úvod

Společenská odpovědnost podniků (CSR) představuje jeden z klíčových konceptů současného řízení organizací, který reaguje na rostoucí potřebu integrovat etické, sociální a environmentální aspekty do strategického rozhodování. CSR již není vnímána pouze jako dobrovolná aktivita, ale jako nezbytný nástroj pro zajištění dlouhodobé udržitelnosti a konkurenceschopnosti. Podniky, které věnují pozornost odpovědnému chování, často posilují svou reputaci, upevňují vztahy se zainteresovanými stranami a zvyšují důvěru svých zákazníků i zaměstnanců.

V kontextu leteckého průmyslu, který patří mezi nejvíce globalizované a environmentálně náročné odvětví, je význam CSR obzvláště výrazný. Letecké společnosti se potýkají s tlakem na redukci emisí skleníkových plynů, efektivní využívání přírodních zdrojů a dodržování stále přísnějších regulačních opatření. Zároveň musí zajistit vysokou kvalitu služeb, bezpečnost cestujících a ekonomickou stabilitu. Tyto nároky kladou na letecké společnosti mimořádné nároky a vyžadují pečlivě zvolené strategie CSR, které dokážou reagovat na tyto výzvy.

Pandemie COVID-19 zasáhla globální ekonomiku a přerušila provoz mnoha leteckých společností. Letecké společnosti musely přehodnotit své přístupy k odpovědnosti, přičemž některé využily pandemii jako příležitost k zavedení nových udržitelných postupů, zatímco jiné byly nuceny redukovat své CSR iniciativy kvůli finančním omezením. Tato situace přinesla nové otázky, například jak pandemie ovlivnila strategické rozhodování leteckých společností v oblasti CSR nebo zda rozdíl

mezi tradičními a nízkonákladovými společnostmi odráží jejich schopnost přizpůsobit se novým podmínkám.

Cílem tohoto článku je prozkoumat implementaci CSR iniciativ evropských leteckých společností v post-covidovém období. Zaměřuje se na analýzu rozdílů mezi tradičními a nízkonákladovými leteckými společnostmi, jejich přístup k implementaci a reportování CSR, rozsah CSR aktivit a jejich vliv na věrnost zákazníků. Dále se článek věnuje tomu, jak pandemie změnila CSR strategie a jak tyto změny přispívají k zajištění udržitelného rozvoje celého leteckého průmyslu.

Význam této problematiky spočívá v tom, že přináší vhled do CSR jako strategického nástroje, který umožňuje leteckým společnostem reagovat na environmentální, sociální a ekonomické výzvy. Tento článek přispívá k současnému poznání tím, že mapuje specifické období a nabízí hlubší porozumění dopadům pandemie na strategický přístup evropských leteckých společností ke společenské odpovědnosti.

2. Pohled na problematiku společenské odpovědnosti podniků

Společenská odpovědnost podniků je pojem, který nelze přesně definovat a v současné době neexistuje jednotná celosvětová definice, je to způsobeno z velké míry tím, že společenská odpovědnost podniků je založena na dobrovolnosti, nemá vymezené hranice, a tak vzniká prostor k širokému chápání a interpretaci tohoto komplexního konceptu. Z tohoto důvodu existuje celá řada definic a přístupů, které se snaží společenskou odpovědnost přiblížit a vymežit. Společenská odpovědnost podniků je tedy dobrovolný závazek podniků chovat se odpovědně ke společnosti i prostředí, ve kterém podnikají.

CSR je komplexní a neustále se vyvíjející koncept, který vyžaduje přístup založený na dobrovolnosti, etice a transparentnosti. Jeho implementace umožňuje podnikům nejen naplňovat své ekonomické cíle, ale také přispívat k řešení globálních výzev, jako je udržitelnost a sociální odpovědnost. V kontextu rostoucího zájmu o společenskou odpovědnost je klíčové, aby podniky nejen uváděly své závazky, ale také je aktivně naplňovaly v praxi.

3. Metodika a metody zkoumání

Cílem článku je identifikace změny konceptu společenské odpovědnosti evropských leteckých dopravců v období po krizi COVID-19 a jak se jejich strategie změnily v průběhu tří klíčových období: před pandemií, během pandemie a v post-pandemickém období. Analýza se zaměřila nejen na vývoj CSR aktivit, ale také na rozdíly v přístupech tradičních a nízkonákladových leteckých společností k CSR, reportování CSR a vlivu CSR na věrnost zákazníků.

Pro získání dat byla využita analýza veřejně dostupných zdrojů a komparace výročních zpráv 20 vybraných evropských leteckých společností, publikovaných mezi lety 2018-2023. Tyto zprávy poskytly přehled o klíčových aspektech CSR, jako je ochrana životního prostředí, podpora komunit a transparentnost. Výzkum byl zaměřen na identifikaci změn v přístupu k CSR a na to, jak se jednotlivé společnosti přizpůsobily měnícímu se prostředí leteckého průmyslu, přičemž zvláštní důraz byl kladen na odlišnosti mezi tradičními a nízkonákladovými dopravci.

Evropské letecké společnosti byly vybrány jako předmět zkoumání kvůli jejich specifickému regulačnímu prostředí. Evropská unie klade na letecký průmysl vysoké nároky v oblasti udržitelnosti a environmentálních standardů, což dělá z tohoto odvětví ideální případovou studii pro analýzu CSR. Pandemie COVID-19 navíc přinesla zásadní změny, které ovlivnily nejen ekonomickou stabilitu těchto společností, ale také jejich přístup k odpovědnosti vůči širší společnosti.

Analýza dat byla provedena postupně, přičemž první fáze zahrnovala sběr dostupných informací z výročních zpráv. Následně byly identifikovány hlavní tematické oblasti CSR, které zobrazovaly priority jednotlivých společností v různých časových obdobích. Výzkum se zaměřil na to, jak pandemie ovlivnila strategické rozhodování společností, a sledoval, jak se jejich přístup k CSR měnil v reakci na pandemii COVID-19. Jedním z cílů bylo také odhalit rozdíly mezi tradičními a nízkonákladovými leteckými společnostmi, které byly zkoumány s ohledem na jejich různé priority a strategie.

Tento výzkum také analyzoval přístup společností k reportování CSR, které má významnou roli při komunikaci CSR aktivit směrem k veřejnosti a zainteresovaným stranám. Zvláštní pozornost byla věnována tomu, jak pandemie ovlivnila transparentnost a rozsah reportování a jaký vliv měly tyto změny na zákaznickou věrnost. Porovnání výsledků obou skupin leteckých společností pak poskytlo hlubší pohled na efektivitu jednotlivých strategií a na to, jak mohou společnosti optimalizovat své CSR aktivity, aby lépe reagovaly na aktuální i budoucí výzvy.

Výsledky této analýzy přispívají k pochopení vývoje CSR v evropském leteckém průmyslu a nabízejí praktická doporučení

pro zlepšení CSR strategií. Tento článek přispívá k současnému poznání tím, že mapuje specifické období a nabízí hlubší porozumění dopadům pandemie na strategický přístup evropských leteckých společností ke společenské odpovědnosti.

4. Výsledky

Cílem analýzy bylo porovnat přístupy tradičních a nízkonákladových leteckých společností k aktivitám v oblasti společenské odpovědnosti. Výsledky ukazují rozdíly nejen v rozsahu a zaměření CSR strategií, ale také v oblasti reportování a dopadu CSR aktivit na zákazníky.

4.1. Rozdíly v CSR strategiích tradičních a nízkonákladových leteckých společností

Analýza CSR přístupů u 20 evropských leteckých společností potvrdila významné rozdíly mezi tradičními a nízkonákladovými leteckými společnostmi. Tradiční společnosti jako Lufthansa, Air France-KLM, British Airways, SAS, Swiss International Air Lines a Iberia zařazují CSR jako součást dlouhodobých podnikových strategií a přistupují k němu komplexně. Věnují se jak ekologickým aspektům, jako je snižování emisí CO₂, investicím do SAF nebo modernizací flotily, tak i sociálním programům zaměřeným na diverzitu, inkluzi a podporu komunit.

Naopak nízkonákladové letecké společnosti, mezi které patří například Ryanair, Wizz Air, EasyJet, Norwegian, Eurowings a další, se zaměřují především na provozní efektivitu. CSR v jejich pojetí znamená především opatření vedoucí ke snížení emisí. Jejich reporty jsou zpravidla kratší a zaměřené převážně na jejich úspěchy, bez dlouhodobé vize.

CSR aktivity tradičních leteckých společností mají zpravidla větší rozsah i hloubku. Lufthansa si například stanovila cíl dosáhnout klimatické neutrality do roku 2050, investuje do vodíkových a elektrických letadel. Air France-KLM se zaměřuje na snižování emisí na osobokilometr a podporu inkluze. British Airways podporuje biodiverzitu, investuje do udržitelného leteckého paliva (SAF) a zavádí komunitní programy.

Na druhé straně Ryanair nebo Wizz Air vyzdvihují svou efektivitu v emisích CO₂ na cestujícího, což je dáno optimalizací tras a moderní flotilou. EasyJet investuje do kompenzace emisí a Norwegian se zaměřuje na provozní úspornost. Sociální odpovědnost u těchto společností zůstává minimální.

4.2. Dopad pandemie COVID-19 na CSR

Pandemie COVID-19 znamenala pro letecký průmysl velký zásah. I přesto, že mnoho leteckých společností bylo nuceno omezit provoz a propouštět, CSR programy nezastavily. Naopak, v mnoha případech byly přizpůsobeny pro krizovou pomoc. Řada společností se zapojila do humanitárních aktivit, od přepravy zdravotnického materiálu až po repatriční lety.

Společnost AirBaltic se i během pandemie zaměřila na podporu komunit prostřednictvím logistické pomoci a zároveň zachovala své environmentální závazky, včetně modernizace flotily. Lufthansa navzdory ekonomickému tlaku pokračovala v investicích do SAF a udržela si také programy zaměřené na podporu zaměstnanců. Finnair zavedl hybridní pracovní modely a pokračoval v přepravě zdravotnického materiálu. EasyJet se i

přes omezený provoz soustředil na udržení pracovních míst a Iberia nadále podporovala místní komunity a zaměstnance. Společnost Turkish Airlines se výrazně zapojil do humanitní pomoci jak v Turecku, tak i v zahraničí, a pokračovala v CSR aktivitách i za ztížených podmínek.

V období po pandemii letecké společnosti obnovily původní CSR strategie, často ve větším rozsahu. Tradiční letecké společnosti posílily investice do SAF a technologických inovací, a také zvýšili transparentnost reportů. Nízkonákladové letecké společnosti dále pokračovaly ve snižování emisí, ale rozvoj sociálních programů zůstal omezený.

4.3. Reportování CSR aktivit

Po pandemii se výrazně zvýšil důraz na kvalitu a rozsah CSR reportů. Tradiční letecké společnosti začaly zveřejňovat rozsáhlejší a strukturovanější zprávy, které zahrnují jak environmentální, tak sociální oblasti. Tyto reporty často obsahují konkrétní cíle, časové harmonogramy a úspěchy. CSR reportování je úzce spojeno s podnikovou strategií a je využíváno jako nástroj komunikace s investory i veřejností.

Oproti tomu nízkonákladové letecké společnosti se v oblasti reportování CSR soustředí zejména na prezentování konkrétních úspěchů, jako je snižování emisí nebo palivová efektivita. Jejich zprávy bývají stručnější a méně detailní než u tradičních leteckých společností.

Tabulka níže zobrazuje rozsah reportů vybraných deseti evropských leteckých společností v období před, během a po pandemii COVID-19. V tabulce jsou modře vyznačeny tradiční letecké společnosti a bíle nízkonákladové letecké společnosti.

Letecká společnost	Název reportu	Rok	Počet stran
Air Baltic	Sustainability report	2019	56
	Sustainability and annual report	2020	85
	Sustainability and annual report	2023	102
Air France-KLM	Registration document	2018	50
	Universal registration document	2020	70
	Universal registration document	2023	102
EasyJet	Annual report and accounts	2018	8
	Annual report and accounts	2020	18
	Annual report and accounts	2023	24
Norwegian	Sustainability report	2018	17
	Annual report	2020	6
	Annual report	2023	10
Ryanair	Annual report	2018	10
	Annual report	2020	14
	Sustainability report	2023	68
Turkish Airlines	Sustainability report	2018	100
	Sustainability report	2020	121
	Sustainability report	2023	200
Wizz Air	Annual report and accounts	2018	5
	Annual report and accounts	2020	9
	Annual sustainability report	2023	29
Virgin Atlantic	Sustainability report	2018	26
	Annual report	2020	8
	Annual report and accounts	2023	48
TAP Air Portugal	Annual report	2018	5
	Sustainability report	2020	14
	Sustainability report	2023	78
Aegean	Sustainable development report	2019	91
	Sustainable development report	2020	78
	Sustainable development report	2023	139

Obrázek 1 – Rozsah CRR reportů

Z tabulky vyplývá, že většina leteckých společností své reporty po pandemii COVID-19 rozšířila. Dále je zřejmé, že většina tradičních leteckých společností má rozsáhlejší reporty než nízkonákladové letecké společnosti, i když existují výjimky, jako například Virgin Atlantic, která má méně rozsáhlé CSR reporty, nebo Ryanair, která má naopak rozsáhlejší reporty. Celkově lze však říct, že tradiční letecké společnosti mají oproti nízkonákladovým leteckým společnostem rozsáhlejší CSR reporty, a všechny letecké společnosti, ať už nízkonákladové, nebo tradiční, své reporty po pandemii COVID-19 rozšířily.

4.4. Dopad CSR na věrnost zákazníků

CSR strategie mají různý vliv na vnímání značky a zákaznickou loajalitu. U tradičních leteckých společností se CSR stává důležitým prvkem zákaznické zkušenosti, společnosti jako Lufthansa, Finnair nebo Air France-KLM propojují své CSR iniciativy s věrnostními programy a nabízejí zákazníkům možnost kompenzace uhlíkové stopy přímo při rezervaci letu. Tyto přístupy posilují důvěru cestujících a vytvářejí pozitivní vztah ke značce.

Naopak u nízkonákladových leteckých společností se hraje hlavní roli cena. Přestože společnosti jako EasyJet nebo Wizz Air uvádějí ekologická opatření ve svých reportech, zákaznická rozhodnutí jsou nadále primárně motivována cenou a frekvencí spojů. CSR v tomto segmentu tedy zatím nemá zásadní dopad na věrnost zákazníků.

4.5. Shrnutí výsledků

Z kvantitativní analýzy sledovaných CSR aktivit vyplývá několik významných zjištění. V oblasti investic do SAF je patrná převaha tradičních leteckých společností. Ze všech 20 analyzovaných společností investuje do SAF celkem 14 leteckých společností, přičemž pouze 2 z nich jsou nízkonákladové. To potvrzuje vyšší angažovanost tradičních leteckých společností v oblasti environmentální udržitelnosti.

V rámci pandemické krize provádělo repatriční lety 8 leteckých společností, přičemž v 7 případech šlo o tradiční letecké společnosti. Tyto aktivity ukazují vysokou míru společenské odpovědnosti v krizových situacích, schopnost rychle reagovat na humanitární potřeby a integrovat CSR do krizového řízení.

V oblasti podpory zaměstnanosti se tradiční letecké společnosti zavazují k udržení pracovních míst a zlepšování pracovních podmínek. Zaměřují se na vzdělávání zaměstnanců, podporu kariérního rozvoje a zajištění férového přístupu.

Tradiční i nízkonákladové letecké společnosti kladou podobný důraz na snižování emisí CO₂ a modernizaci flotily s cílem zvýšit efektivitu a snížit negativní environmentální dopady.

Transparentnost CSR reportů je dalším odlišujícím faktorem. Tradiční letecké společnosti vydávají rozsáhlé a detailní zprávy, zatímco nízkonákladové společnosti publikují spíše stručné reporty zaměřené hlavně na provozní ukazatele.

Celkově výsledky potvrzují, že CSR strategie leteckých společností v Evropě jsou silně ovlivněny obchodním modelem a strategickými prioritami.

Tabulka níže porovnává tradiční a nízkonákladové letecké společnosti v oblastech ekologické a sociální odpovědnosti, přičemž tradiční letecké společnosti se v těchto oblastech angažují více než nízkonákladové letecké společnosti. Z pohledu reportování mají tradiční letecké společnosti komplexnější a obsáhlejší reporty, zatímco nízkonákladové letecké společnosti se ve svých reportech zaměřují především na emise a náklady. Uplatňování CSR aktivit má vliv spíše na zákazníky tradičních leteckých společností než nízkonákladových, kde velkou roli hraje právě cena. Tabulka také zobrazuje možná zlepšení pro tradiční letecké společnosti, jako je nalezení rovnováhy mezi udržitelností a ekonomikou nebo intenzivnější spolupráce s vládními institucemi. Pro nízkonákladové letecké společnosti se doporučuje větší zaměření na aktivity v oblasti společenské odpovědnosti, motivace cestujících k udržitelnějšímu cestování a zlepšení pracovních podmínek zaměstnanců.

Oblast	Tradiční letecké společnosti	Nízkonákladové letecké společnosti
Ekologická odpovědnost	Investice do SAF, modernizace flotily, snižování emisí CO ₂ , podpora ekologických inovací	Optimalizace letových tras, úspornější letadla, základní ekologická opatření
Sociální odpovědnost	Podpora komunit, vzdělávací programy, diverzita, inkluze, charitativní	Omezená podpora sociálních iniciativ, primárně zaměřeno na efektivitu

	projekty, lepší pracovní podmínky	a zaměstnanecké benefity
CSR reportování	Detailní a transparentní zprávy, široká škála sledovaných ukazatelů	Zaměřené hlavně na emise a náklady, méně komplexní reportování
Vliv na zákazníky	Ekologické věrnostní programy, možnost kompenzace uhlíkové stopy, udržitelnější volby cestování	Hlavní faktor rozhodování = cena, minimální dopad CSR na zákaznické rozhodování
Možná zlepšení	Vyvážit udržitelnost s ekonomikou, posílit spolupráci s vládami, investice do zaměstnaneckých programů	Rozšířit CSR o sociální odpovědnost, motivovat zákazníky k udržitelnému cestování, více se zaměřit na pracovní podmínky

Tabulka 1 - Porovnání nízkonákladových a tradičních leteckých společností

5. Závěrečná doporučení

Na základě analýzy CSR strategií tradičních a nízkonákladových leteckých společností byly zjištěny významné rozdíly v přístupu k ekologické a sociální odpovědnosti. Tradiční letecké společnosti se více angažují v udržitelnosti a sociálních iniciativách, zatímco nízkonákladové společnosti se soustředí především na ekonomickou efektivitu.

Pro nízkonákladové letecké společnosti by bylo přínosné rozšířit CSR iniciativy a začít více investovat do sociální odpovědnosti. Doporučuje se zavedení programů na podporu diverzity a inkluze, ekologických výzev pro zákazníky, nebo zavedení možnosti kompenzace uhlíkových emisí. To by mohlo zlepšit vnímání těchto společností jako odpovědných a udržitelných dopravců.

Tradiční společnosti by měly hledat rovnováhu mezi investicemi do udržitelnosti a ekonomickou efektivitou, aby jejich CSR strategie nezatěžovaly finanční stabilitu. Posílení spolupráce s vládními a nevládními organizacemi by mohlo podpořit výzkum v oblasti udržitelných technologií.

Uvedené příklady s sebou nesou také finanční náklady, kterým by letecké společnosti čelily po zavedení těchto iniciativ. To by mohlo představovat problém hlavně pro nízkonákladové společnosti, které si zakládají na nízkých nákladech a s tím spojených nízkých cenách letenek. Tyto náklady by však mohly být kompenzovány například zavedením dobrovolných programů pro zákazníky. V rámci těchto programů by zákazníci mohli přispívat na udržitelné projekty a snížení uhlíkové stopy, což by umožnilo financovat CSR aktivity bez nutnosti zdražení. Tuto možnost již tradiční letecké společnosti nabízejí. Mezi další možnosti patří partnerství s ekologickými organizacemi a

soukromými investory, spolupráce s vládními institucemi a získání dotačních prostředků, například grantů.

Tímto způsobem by bylo možné rozšířit CSR strategie bez zásadního narušení obchodního modelu nízkonákladových leteckých společností a pomohlo by jim to zůstat konkurenceschopnými a zároveň se více angažovat v otázkách společenské odpovědnosti.

Závěrem lze říct, že se tradiční a nízkonákladové letecké společnosti liší v mnoha ohledech, ať už jde o implementaci, reportování nebo vliv CSR iniciativ na zákazníky. Letecké společnosti se v rámci své CSR strategie aktivně zapojují do různých iniciativ a usilují o pokrytí všech klíčových oblastí CSR v závislosti na svých možnostech a prioritách. Výsledky analýzy ukazují, že se letecké společnosti snaží zůstat konkurenceschopnými, transparentními a zodpovědnými dopravci. Přesto stále existují určité nedostatky, které je třeba zlepšit a tím posílit jejich celkovou udržitelnost.

6. Závěr

Tento článek se zaměřil na problematiku společenské odpovědnosti evropských leteckých společností, přičemž sledoval, jak se jejich přístupy k CSR změnily v období před, během a po pandemii COVID-19. Cílem bylo analyzovat rozdílné strategie tradičních a nízkonákladových leteckých společností a zhodnotit, jak pandemie ovlivnila vnímání a implementaci CSR v tomto odvětví.

Výzkum byl založen na kvalitativní analýze výročních a CSR zpráv dvaceti evropských leteckých společností, přičemž byl zkoumán vývoj CSR strategií ve třech klíčových obdobích. Výsledky ukázaly, že tradiční společnosti mají tendenci přistupovat k CSR komplexněji a systematictěji než nízkonákladové společnosti, které se často soustředí především na ekologické iniciativy, jako je snižování emisí. Pandemické období přineslo změny, kdy získaly prioritu humanitární aktivity, zatímco jiné oblasti CSR byly dočasně opomíjeny. Po pandemii však došlo k obnovení a rozšíření zájmu o CSR, což naznačuje její rostoucí význam v dlouhodobých strategiích leteckých společností.

Důležitým zjištěním je, že přestože letecký průmysl čelí tlaku na snižování emisí, společnosti stále častěji zahrnují širší škálu CSR aktivit, tedy nejen ekologických, ale také sociálních. To vychází nejen z legislativních požadavků, ale i z rostoucích očekávání zákazníků, investorů a veřejnosti. Důvěra veřejnosti a pozitivní image se tak stávají klíčovými faktory konkurenceschopnosti v tomto odvětví.

Závěrem lze říct, že CSR se postupně stává nedílnou součástí strategického řízení leteckých společností. I když tradiční a nízkonákladové společnosti stále vykazují rozdíly v přístupu k CSR, je zřejmé, že jeho význam bude nadále růst. Tento článek upozorňuje na potřebu hlubší integrace CSR do podnikových strategií leteckých společností a nabízí konkrétní doporučení, která mohou přispět k optimalizaci jejich přístupu.

Reference

MAINTOKOVÁ, Aneta, Bc.: Společenská zodpovědnost evropských leteckých společností v post-COVIDovém období [Diplomová práce]. Žilinská univerzita v Žilíně. Fakulta prevádzky

a ekonomiky dopravy a spojov; Katedra leteckej dopravy. Vedúci diplomovej práce: TOMOVÁ, Anna, prof. Ing. CSc.; Stupeň odbornej kvalifikácie: Inžinier. Žilina: FPEDAS, ŽU, 2025. 85 s.



ÚPRAVA TEPELÉHO MANAŽMENTU MOTORA ROTAX 912 PRE LIETADLO WT-9 DYNAMIC V ÚLOHE VLEČNÉHO LIETADLA

Ivan Maršala
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The article of my diploma thesis entitled Modification of the thermal management of the Rotax 912 engine in the role of a WT-9 Dynamic towing aircraft focuses on the modification of the cooling system with an emphasis on improving the cooling efficiency during the towing operation of the aircraft. Since the Rotax 912 engine is also very popular in other aircraft, the topic of the thesis was accompanied by the problem of the WT-9 Dynamic aircraft due to overheating during towing and the subsequent implementation of how to solve the problem. In the introductory chapters of the thesis, the reader is described the basic characteristics of towing, the individual engine systems that make it up and the associated consequences of high temperatures. In the second part of the thesis, the issue of the cooling system, the solution proposal and the practical implementation of the proposal are described. In the last third part, the reader is described the actual commissioning of the new and more powerful cooling system and the evaluation of the results of the work.

Keywords

Cooling system, Rotax 912, WT-9 Dynamic, Overheatin, Towing

1. Úvod

Bezmotorové lietanie je neoddeliteľnou súčasťou letectva. Vetroň je lietadlo ťažšie ako vzduch, pri ktorom vztlak potrebný na let vykonávajú aerodynamické sily na jeho nepohyblivých nosných plochách a ktorého voľný let nie je závislý od motora. Vetroň svoj let vykonáva meteorologické termické podmienky. Pilot vetroňa využíva pre svoj štart vlečné motorové lietadlo, ktoré je pripojené lanom. Úlohou vlečného lietadla je dostať vetroň do požadovanej výšky, ktorú si pilot vetroňa sám zvolí alebo miesto s priaznivými termickými podmienkami. Počas letu pilot vetroňa letí súbežne s vlečným lietadlom. Po odpútaní vlečného lana, sa pilot vetroňa snaží vyhľadať priaznivé podmienky pre jeho stúpanie a kalkuluje svoju výšku a vzdialenosť k bezpečnému návratu na letisko vzletu alebo stanoveného bodu, kde sa chce pilot dostať. Niektoré vetrone sú vybavené elektrickými alebo spaľovacími motormi, čo značne zjednodušuje celú prevádzku pre vzlet ale cena takého vetroňa je vysoká. Problematika bezmotorového lietania nastáva v letných dňoch, kedy podmienky sú výrazne nevyhovujúce z dôvodu vysokých vonkajších teplôt, kedy sa motor vo vlečnom lietadle značne prehrieva a lietadlo degraduje pri stúpaní v porovnaní s jarným alebo jesenným obdobím. Na to aby pilot zabránil prehrievaniu motora je potreba zvýšiť rýchlosť letu ale len v rozsahu, ako je stanovená maximálna rýchlosť vetroňa počas vleku. V letných dňoch sú podmienky značne komplikované, kde ani zvyšujúca rýchlosť nemusí vyriešiť chladenie motora. Na to aby sme vyriešili chladenie motora je potreba upraviť chladiacu sústavu, poprípade nahradiť novou a výkonnejšou sústavou, ktorá dokáže zvládnuť nepriaznivé podmienky.

2. Vlečný letún

Letún musí mať certifikované zariadenie schopné na vlekanie vetroňov. Na Slovensku máme niekoľko výrobcov, ktorí vyrábajú letúne, ktoré sú schopné vykonávať vlečnú činnosť. Prievidzská spoločnosť Aerospool, ktorá vyrába lietadla WT-9 Dynamic je veľkým exportérom do zahraničia, následne tu dominuje spoločnosť TomarkAreo so svojimi letúňmi ViperSD4 a firma Eurofox, ktorá vyrába taktiež vlečné lietadla Fox s rôznymi konfiguráciami.



Obrázok 1 WT-9 Dynamic s označením OM-W214 zdroj: Autor

Každé vlečné lietadlo má svoje pozitíva a negatíva a zákazník si vyberá dané lietadlo hlavne podľa výkonu a ceny. Požiadavky na vlečné lietadlo je hlavne výkon, nízka cena, rýchlosť a nízke prevádzkové náklady. Momentálne na trhu dominuje značka WT-9 Dynamic. Tento typ je momentálne najviac využívaný v Aerokluboch na Slovensku, Česku, Rakúsku a Nemecku, zároveň expanduje do celého sveta, čím sa stáva populárnym. Tento typ vlečného lietadla nahrádza dlho trvajúce lietadlá Zlín modelu Z43, Z142, Z205, Z526 a ďalšie modely.

3. Motor Rotax 912

Táto pohonná jednotka je základnou súčasťou lietadla WT-9 Dynamic. Náš spomínaný typ používa pohonnú jednotku Rotax 912. Jeden z najviac vyrábaných leteckých piestových motorov do ultraľahkých letúnov. V ponuke je niekoľko variant 80HP, 100HP a následne existujú pracoviská, kde je možné ešte zvýšiť výkon motora na 120HP. Životnosť motora je 2000 hodín a je jednoduchý na údržbu, čo z neho robí atraktívnu voľbu pre pilotov, ktorí lietajú rekreačne ale aj profesionálne. Pomer výkonu a hmotnosti tohto štvortaktného motora je jeden z najlepších na trhu, čo sa aj odzrkadľuje kde sa všade tento motor vyskytuje.

Tabuľka 8 Technické špecifikácie motora Rotax 912

TYP	UL/F/A	ULS, S
MAX. VZLETOVÝ VÝKON [KW] (HP)	59,6 (80) 5800/min	73,5 (100) 5800/min
MAX. TRVALÝ VÝKON [KW] (HP)	58 (79) 5500/min	69 (95) 5500/min
MAX. KRÚTIACI MOMENT [Nm]	103 pri 4800/min	128 pri 5100/min
MAX. OTÁČKY [1/min]	5800	5800
VOLNOBEŽNÉ OTÁČKY [1/min]	1400	1400
ZDVIHOVÝ OBJEM [cm ³]	1211	1352
VRTANIE [mm]	79,5	84
ZDVIH [mm]	61	61
KOMPRESNÝ POMÉR [-]	9,0:1	10,5:1
VÝKON GENERÁTORA [W]	250	250
NAPÄTIE [V]	13,5	13,5

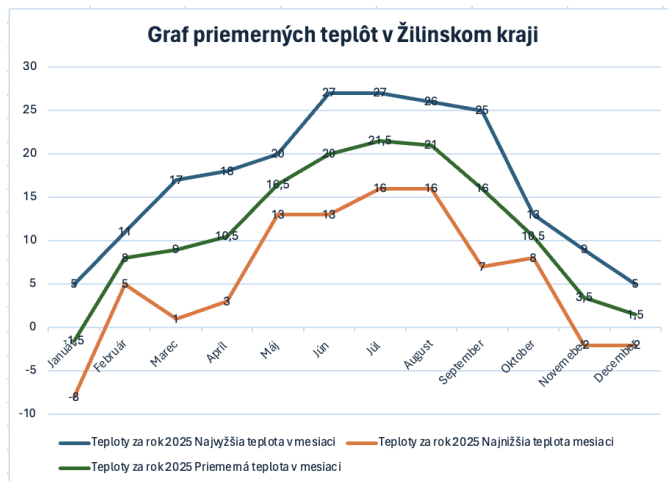
4. Problematika chladiacej sústavy

Pilot po vykonaní všetkých bezpečnostných opatrení vrátane kontroly motorovej skúšky, ktorá bola opísaná v predošlých kapitolách a po pripnutí vlečného lana, neustále kontroluje parametre motora, teploty oleja, vody a ďalších parametrov. Pilot nastaví maximálny výkon lietadla, kedy sa otáčky vrtule pohybujú 5700 ot/min. Po odpútaní lietadla od zeme, pilot kontroluje aj vetroňa či už došlo k odpútaniu od zeme. V tejto fáze je ešte vo výdrži, kedy sa pilot vlečného lietadla snaží získať bezpečnú rýchlosť na stúpanie. Po dosiahnutí rýchlosti si pilot musí dať pozor aby neprekročil maximálnu stanovenú rýchlosť za vleku, túto rýchlosť vieme zistiť v prevádzkovej príručke od vetroňa. Pilot prechádza do prechodového oblúku na stúpanie, kedy skontroluje prevádzkové prístroje a následne upraví otáčky vrtule na 5500 otáčok, tieto otáčky predstavujú maximálny trvalý režim lietadla. Priemerná rýchlosť vo vleku sa pohybuje okolo 110-130km/h. Počas vleku môže nastať niekoľko faktorov prehrievania prevádzkových kvapalín. Najväčšie teploty prevádzkových kvapalín môžeme zaznamenať hlavne v letných dňoch, kedy vysoká teplota vzduchu a nízka hustota degraduje lietadlo v stúpaní ale aj chladení. Teplota vody na zemi môže dosahovať okolo 90°C ale počas letu môže teplota vody dosiahnuť viac ako 120 °C kedy hrozí po prekročení vyvretie kvapaliny. Podobné prehrievanie môže nastať u oleja kde po prehriati stráca svoje vlastnosti a hrozí zadretie motora [20,21].

4.1. Zber nameraných dát vlečnej činnosti

V tabuľke si môžeme všimnúť priemerné teploty z oblasti Žilinského kraja odkiaľ nám pochádza samotný letún, konkrétne v Martine. Tabuľka opisuje minimálne a maximálne teploty za deň spolu s priemernou teplotou v mesiaci. Vďaka týmto teplotám vieme bližšie objasniť, kedy chladiaca sústava Rotax 912 bude mať najvyššiu záťaž pri chladení. Motor Rotax 912 je

pri bežnej prevádzke pokiaľ sa jedná o navigačné lety alebo lety okolo priestoru, stavaný na takúto formu záťaže ale z hľadiska vlečnej činnosti, kedy lietadlo letí nízkou rýchlosťou a na trvalom stúpacom výkone, začína celá chladiaca sústava degradovať. V tabuľke si môžeme všimnúť hlavne vyznačené letné mesiace,



Obrázok 2 Graf priemerných hodnôt v Žilinskom kraji

pri ktorých sústava najviac prehrievala.

Graf, znázorňujúci minimálne, maximálne a priemerné teploty za rok 2024, nám vizualizuje časový horizont, ako sa teploty pohybovali v danom mesiaci. V tabuľke si môžeme všimnúť zelenou farbou zvýraznené hodnoty, ktoré boli pre motor počas vlekania kritické. Práve v týchto mesiacoch sa motor najviac prehrieval a dosahoval vysoké teploty počas vlekania nad, 120°C. Od januára až do mája na motore neboli zaznamenané zo strany pilotov a prevádzkovateľa lietadla problémy prehrievania chladiacej kvapaliny v lietadle. V nasledujúcich mesiacoch, jún, júl, august, sa chladiaca kvapalina v motore začala prehrievať. Čo značne skomplikovalo vlečnú činnosť. Práve v týchto mesiacoch sme zaznamenali aj vysokú frekvenciu vlečnej činnosti a v niektorých prípadoch sa stávalo, že pilot vlečného lietadla musel požiadať pilota na vetroni aby sa predčasne odpútal počas vleku z dôvodu kritických teplôt. Pilot na vetroni sa odpútal v bezpečnej výške, kedy dokázal doletieť späť na letisko vzletu. V mesiacoch september až do konca decembra sa teploty znižovali, kde motor dokázal fungovať v stanovených prevádzkových teplotách.

5. Metodika a metódy skúmania

Na metódu zberu údajov sa zameriavame hlavne prvej časti diplomovej práce. Tieto údaje sú získane hlavne z internetových zdrojov, dostupných manuálov od motora Rotax 912 ULS a knižných zdrojov. Môžeme ju rozdeliť na niekoľko častí. V prvej časti bola vykonaná analýza dostupných údajov o základných požiadavkách vlečnej činnosti. V druhej časti diplomovej práce sa zameriavame na technickú analýzu jednotlivých sústav motora Rotax 912 ULS, ktorá hrá kľúčovú úlohu pre pochopenie danej problematiky. V tretej časti diplomovej práce, je rozbor priemerných teplôt za rok 2024 a zhodnotenie v ktorých mesiacoch chladiaca sústava vykazuje maximálnu záťaž a či má zmysel chladiacu sústavu upraviť. V štvrtej časti sa zameriavame na návrh a hodnotenie technických úprav, ktoré boli zo

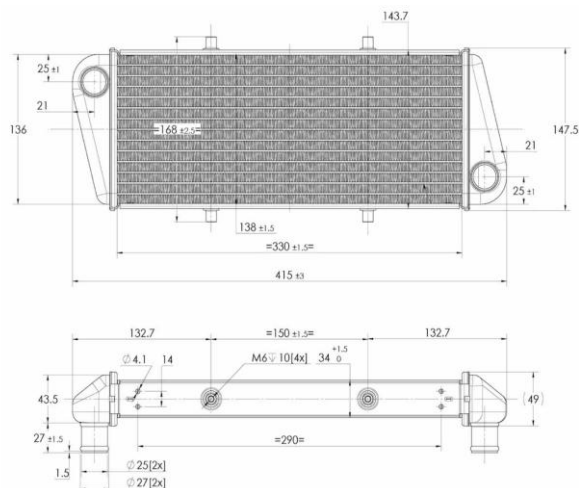
zozbieraných dát. Práve takýmto spôsobom som dokázal získať komplexný prehľad informácií o problematike, ktoré mi vytvorili základ pre splnenie cieľov diplomovej práce. Metóda analýzy údajov bola zameraná hlavne v kľúčových oblastiach, ktoré tvorili analýzu vlastností jednotlivých sústav motora Rotax 912 ULS, hlavne pri chladiacej sústave, ktorá bola primárnym cieľom diplomovej práce. Práve analýza chladiacej sústavy mi pomohla odhaliť nedostatky pôvodnej sústavy a nájsť riešenie, ktoré by dokázalo vyriešiť problém prehrievania. Metódou syntézy, ktorá sa zaoberala hlavne návrhovou časťou diplomovej práce bolo využiť integráciu poznatkov získania z analýz dostupných údajov. Tieto dostupné údaje obsahovali technické výkresy, dokumentácie, príručky, simulácie, internetové zdroje vrátane diskusných fór. Vďaka tejto metóde som dokázal spojiť jednotlivé komponenty a materiály, a vytvoriť nový funkčný celok chladiacej sústavy.

6. Návrh technických úprav motora

Po získaní dostupných údajov sme zhodnotili, že rastúca vlečná činnosť hlavne v čase letných dní priniesla svoje pozitíva ale aj negatíva. Pozitívum bolo z hľadiska dopytu vlečnej činnosti ale veľké negatívum bolo spojené s prehrievaním motora v letných dňoch. Samotný návrh riešenia bol spomínaný už v úvodných kapitolách, a je ním kúpa nového chladiča pre náš spomínaný motor Rotax 912.

6.1. Návrh 1 13 lamelový chladič

Na technickom výkrese je znázornený chladič ktorý sa skladá z 13 rebier. Náš predošlý chladič tvorí len 11 rebier, čo značne znižuje jeho účinnosť pri chladení. Cena tohto chladiča sa od výrobcu Aerospool pohybuje okolo 570 €. Ďalší rozdiel pri tomto chladiči je aj výška. Pôvodný 11 lamelový chladič mal výšku 140mm, nový 13 lamelový chladič má o 7.5mm väčšiu výšku.

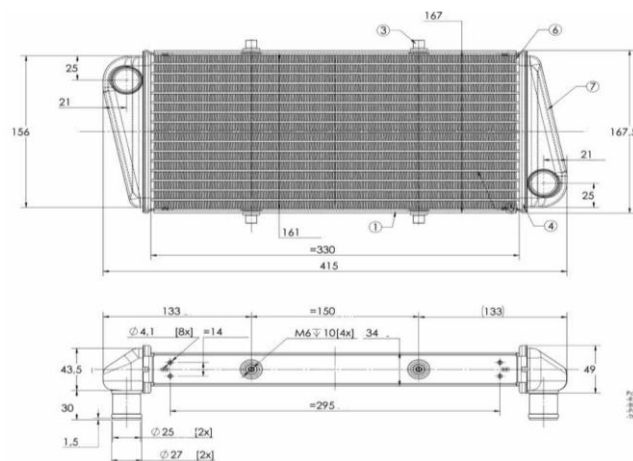


Obrázok 3 Technický výkres 13 lamelového chladiča

Na technickom výkrese je znázornený chladič ktorý sa skladá z 13 rebier. Náš predošlý chladič tvorí len 11 rebier, čo značne znižuje jeho účinnosť pri chladení. Cena tohto chladiča sa od výrobcu Aerospool pohybuje okolo 570 €. Ďalší rozdiel pri tomto chladiči je aj výška. Pôvodný 11 lamelový chladič mal výšku 140mm, nový 13 lamelový chladič má o 7.5mm väčšiu výšku.

6.2. Návrh 2 15 lamelový chladič

V druhom návrhu sme hľadali ešte výkonnejší chladič s väčším množstvom lamiel. V tomto prípade sme si museli dať pozor, pretože limitujúca je hlavne veľkosť chladiča. Spoločnosť Teveso, ktorá úzko spolupracuje s firmou Rotax a zároveň je oficiálnym a originálnym distribútorom náhradných dielov pre motory Rotax, nám predstavila výkonnejšiu variantu chladiča. Ide o 15 rebrovaný chladič, ktorý sa používa hlavne pre motory Rotax 914.



Obrázok 4 Technický výkres 15 lamelového chladiča

7. Praktická výmena chladiacej sústavy motora Rotax 912



Obrázok 5 Vnútrná výplň steny vstupného ústrojenstva a zabrušená stena pripravená na lamináciu a proces lepenia za pomoci epoxidovej živice

Po demontovaní chladiča a samotnom vypustení chladiacej kvapaliny sme sa zamerali na vyčistenie pôvodného chladiča. Tento chladič obsahoval čistočky nečistôt, ktoré znižovali jeho účinnosť, zamerali sme sa tiež na vyčistenie vstupnej sústavy, ktorú sme si pripravili na samotnú úpravu.

7.1. Proces merania

Vstupné ústrojenstvo chladiacej sústavy sme museli zmerať, z dôvodu výmeny výkonnejšieho chladiča, ktorý mal síce rovnakú dĺžku ako pôvodný chladič, ale bol vyšší o 2.5 cm. Na to aby sme vedeli správne umiestniť chladič do vstupného ústrojenstva bolo potrebné vonkajší kryt sústavy odrezať a zväčšiť jeho výšku. Zároveň sme museli postupovať opatrne lebo vstupná sústava sa skladala z kompozitných materiálov, dve vrstvy sklolaminátu a jedna vrstva karbónu. Táto tenká vrstva kompozitného materiálu držala celý chladič pohromade.



Obrázok 6 Odrezaný vonkajší kryt vstupného ústrojenstva

pomyselnú rovinu na stene vstupnej sústavy. Takúto rovinu si vieme pripraviť, keď odrezaný spodný kryt vstupnej sústavy spojíme s chladičom a so spodnou stenou vstupnej sústavy. Následne tieto časti dopasujeme a pripravíme si držiaky, ktoré sme odrezali z polystyrénu v tvare L.



Obrázok 7 Vstupné ústrojenstvo spojené s chladičom a odrezanou spodnou časťou kde držiaky v tvare vytvárajú pomyselnú rovinu

Pomocou teplotnej pištole sme lepiacimi tyčinkami pripevnili tieto plastové držiaky o chladič aby sme si zabezpečili rovinu, ako bude uchytený spodný kryt chladiča. Následne sme chladič odmontovali, kde sme si opäť pripravili polystyrén. Z polystyrénu sme vyrezali výplň v tvare steny, ktorú sme následne prilepili o vnútornú stenu vstupného ústrojenstva. Keď nám polystyrén s lepidlom zaschol, tak sme pomocné držiaky odstránili a začali sme pripravovať vonkajší povrch na zalaminovanie vonkajšej časti.

Počas zbrusovania povrchu vieme vizuálne zistiť koľko vrstiev má kompozit. V našom prípade to boli 3 vrstvy. Následne sme si pripravili dve vrstvy sklolaminátu a jednu vrstvu karbónu. Tieto vrstvy sme si vystrihli z tkaniny v požadovanom tvare. Povrch



Obrázok 8 Vystrihnutá tkanina a nanosená na povrch s epoxidovou živicom

sme si vyčistili a odmastili. Na to, aby sme vedeli tieto 3 vrstvy spojiť použijeme epoxidovú živicu spolu s tužidlom. Je potreba brať do úvahy, aby sme epoxidovú živicu spolu s tužidlom zmiešali v požadovanom pomere, aby nám živica vedela správne vytvrdnúť. Správny pomer je 100A:23B. Hodnota A nám predstavuje epoxidovú živicu a hodnota B tužidlo. Následne sme naniesli epoxidovú živicu zmiešanú s tužidlom na priloženú tkaninu o povrch. Postupným nanášaním tkaniny nanášame živicu a dopasujeme o povrch. Keď sme naniesli prvé dve vrstvy sklolaminátu, tak poslednú vrstvu bude tvoriť karbón.

8. Montáž chladiacej sústavy a ostatných komponentov

Po vykonaní všetkých úprav na vstupnom ústrojenstve chladiacej sústavy, chladiča a spodného krytu, sme zapojili chladič na sústavu hadíc. Následne sme doliali prevádzkové kvapaliny a vykonali posledné vizuálne prehliadky, kde sme dbali na kontrolu netesností. Sústavy hadíc používajú spojovacie objímky, ktoré treba dôsledne primontovať. Zároveň plnia nielen funkciu upevnenia hadice o chladič, ale aj dodatočné utesnenie hadice. Po primontovaní chladiča sme opäť vrátili sústavu karburátorov na pôvodné miesto, to isté platilo aj pri olejovom chladiči. Následne sme začali s montážou vrtule. Tá prebiehala jednoducho, keďže na samotnej vrtuli boli vyrobené závit, ktoré boli maticami upevnené. Tieto matice musia mať predpísaný moment, ktorý je stanovený v príručke o údržbe. Po nasadení vrtule sme namontovali spodný kryt, kde sme ešte nasadili chladič na objímku a zaistili spojovacou závlačkou, ktorá slúži na zaistenie chladiča a spodného krytu aby nedošlo k jeho uvoľneniu.

9. Prvý štart

Po úspešnom namontovaní všetkých dielov sme lietadlo postavili pred hangár, kde sme ho zaistili klinmi, aby nedošlo k jeho pohybu. Následne sme vykonali prvé naštartovanie. Keďže lietadlo bolo po kompletnej prehliadke, bez nastavených karburátorov, ktoré sa nastavujú až počas prevádzky, tak v prvej fáze naštartovania motor pracoval nepravidelne, hlavne nízkych otáčkach 1650 ot/min. Motor sprevádzalo jemné trasenie, toto trasenie bolo spôsobené práve rozladenými karburátormi. Keď motor dosiahol vyššie otáčky, okolo 2000 ot/min a viac, už pracoval kultivovane bez trasenia. Keď sme lietadlo dostali do prevádzkových teplôt, ktoré boli spomínané v úvodných kapitolách, tak sme použili prístroj CarbMate TS-111. Po zapojení do sacieho potrubia sme začali s postupnou synchronizáciou. Po zosynchronizovaní karburátorov, sme znížili otáčky motora na minimálny výkon a sledovali sme prípadné zmeny. Keďže nenastali prípadné zmeny, vykonali sme motorovú skúšku, kde sme kontrolovali, či sústava magnet plní svoju úlohu a či nevznikli problémy na zapaľovacej sústave. Spôsob ako jednoducho skontrolovať zapaľovaciu sústavu je jednotlivým vypnutím a zapnutím jedného okruhu magnet a sledovať poklesy otáčok na vrtuli, kde po vypnutí jedného okruhu magnet nesmie presiahnuť 300 ot/min a rozdiel medzi dvoma okruhmi nesmie presiahnuť 120 ot/min. Na nasledujúcom obrázku sú znázornené prevádzkové teploty motora počas vykonávania motorovej skúšky. Môžeme si všimnúť, na ukazovateli CHT, ktorý sa nachádza ľavom hornom

rohu, že teplota vody sa pohybuje 70°C. Keďže motor Rotax používa ako chladiace médium okrem vzduchu aj chladiacu kvapalinu, tak táto chladiaca kvapalina chladí hlavy valcov. Zároveň môžeme povedať, že motor Rotax 912 využíva kombinovanú chladiacu sústavu. Kvapalinové chladiace médium je na báze vody a glykólu, ktoré umožňuje zvýšiť účinnosť chladenia a hlavne zvýšiť toleranciu kvapaliny proti jej vyvretiu.



Obrázok 8 Prevádzkové teploty počas vykonania motorovej skúšky

V ďalších kapitolách sa zameriame na podrobné opísanie záletov a aké nastali zmeny po výmene chladiča, prípadne či nastali problémy počas letu. Podrobne si opíšeme ako prebiehali lety počas vlečnej činnosti.

10. Prvý let

Prvý let sa konal v pondelok 31.03.2025, pred vzletom bola vykonaná motorová skúška, ktorá preukázala funkčnosť všetkých systémov v lietadle. Počas letu bolo zaznamenaná zvyšujúca sa teplota vody. Pilot zaznamenal, že teplota presahovala 120°C pri stúpaní. Pilot prešiel do horizontálneho letu, kde lietadlo dosahovalo cestovnú rýchlosť 220km/h ale teplota vody sa stále držala na 120°C. Následne vykonal pristátie na letisku, kde sme začali sériu kontrol, či nedošlo k vyvretiu kvapaliny. Po krátkej vizuálnej prehliadke sme odmontovali vonkajší kryt motora a zistili sme, že v nádržke chýba chladiaca kvapalina. Aj keď pred údržbou boli prevádzkové kvapaliny doplnené. Vzhľadom na väčší chladič, ktorý odoberie väčšie množstvo prevádzkovej kvapaliny a nemusí dostačovať k správne chladeniu. Je treba poznamenať, že počas vykonania motorovej skúšky, motor dosiaha prevádzkovej teploty vody okolo 70°C a až počas letu teplota chladiacej kvapaliny dokáže vzrásť nad teplotu, pretože motor pracuje na maximálnom trvalom výkone. Pre správne chápanie chladiacej sústavy si ju musíme rozdeliť na dve časti. Vnútornej a vonkajšej okruh cirkulácie chladiacej kvapaliny. Úlohou vnútorného okruhu je zabezpečiť aby sa studená chladiaca kvapalina vedela rýchlejšie zohriať a dostať motor do prevádzkových teplôt. Keď motor počas prevádzky dosiaha prevádzkové teploty vo

vnútornom okruhu, úlohou termostatu je otvoriť ventil do vonkajšieho okruhu, kde zohriata kvapalina putuje do chladiča na ochladenie. Po následnom doplnení chladiacej kvapaliny sme vykonali opäť motorovú skúšku a keďže motor bol ešte stále v prevádzkových teplotách, tak sme kontrolovali či nedôjde k vyvretiu kvapaliny na zemi. Teplota vody klesla na hranicu 90°C a počas vizuálnej kontroly objem chladiacej kvapaliny v nádržke mierne vzrástol z dôvodu expanzie kvapaliny.

11. Druhý let

Druhý let sa konal v ten istý deň ale po krátkom zálete, kedy pilot vykonal stúpanie v maximálnom trvalom režime. Teplota chladiacej kvapaliny sa stále pohybovala na 90°C, čo bolo ideálne oproti predošlému letu. Pilot vykonal aj sériu okruhov, ale nič nenaznačovalo zvýšenie teploty chladiacej kvapaliny.

12. Testovanie chladiacej sústavy počas aerovleku



Obrázok 9 Teplota chladiacej kvapaliny po pristáti

Následne, keďže v ten deň sa na letisku nachádzali plachtári a mali záujem letieť, tak sme rovno otestovali lietadlo v prevádzke počas vlečnej činnosti. Prvý aerovlekový štart bol s vetroňom JS-1C s rozpätím 21m. Tento vetroň môže mať maximálnu povolenú váhu na vzlet 600kg. Počas aerovleku sa teplota vody pohybovala 100°C, čo dokazovalo, že úprava chladiacej sústavy preukázala svoje kvality. Rýchlosť aerovleku sa pohybovala okolo 130 km/h oproti ľahším typom vetroňov. Následne prebehli ešte dva štarty. Druhý štart bol s ľahkým jednosedadlovým vetroňom VSO-10 Gradient, ktorého maximálna vzletová hmotnosť je 380 kg, čo nepredstavovalo zvýšenú záťaž pre lietadlo a počas aerovleku sa teplota vody pohybovala do 100°C. Tretí a posledný aerovlek bol o čosi náročnejší, pretože sme vlekali G103 Twin Astir. Tento vetroň je dvojsedadlový, určený na výcvik pilotov a prelety. Maximálna vzletová hmotnosť G103 je 650kg, čo je ešte o 50kg viac ako pri JS-1C. Vzhľadom na vyššiu hmotnosť vetroňa, sa zvýšil čas aerovleku. Teplota chladiacej kvapaliny ale nepresiahla viac ako 110°C, čo je v našom prípade je to ideálne. Hraničné hodnoty sú hlavne pri 130°C, takže v tomto prípade máme ešte bohatú rezervu.

05.04.2025 sme už lietadlo využívali v plnej prevádzke, maximálna teplota sa pohybovala do 110°C a na lietadle neboli zaznamenané problémy s prehrievaním ani iné technické problémy. Akonáhle lietadlo po odpútaní vetroňa začalo klesať, chladiaca sústava dokázala efektívne chlaďiť horúcu chladiacu kvapalinu a jej teplota dokázala klesnúť, v niektorých prípadoch aj na 90°C. V danom dni sa vykonalo 13 vlekov, z čoho 5 vlekov tvorilo ťažšie vetrone s maximálnou vzletovou hmotnosťou 600kg a viac. V nasledujúcom obrázku sú znázornené prevádzkové teploty po pristátí.



Obrázok 10 Teplota chladiacej kvapaliny po pristátí aerovleku

13. Záver

Po úprave chladiacej sústavy na lietadle WT-9 Dynamic s označením OM-W214 vieme preukázať vyššiu účinnosť chladiacej sústavy. Najväčším problémom chladiacej sústavy boli, už práve spomínané v predošlých kapitolách, vyššie teploty chladiacej kvapaliny a neustále prehrievanie motora v letných dňoch. Práve tieto teploty nám zapríčinili v niektorých prípadoch aj obmedzenie vlečnej činnosti, kedy sa dalo lietať len nad ránom alebo ku večeru po poklese vonkajších teplôt. Na to aby sme dokázali v letných dňoch lietať aj cez deň, museli sme redukovať počet vlekov a neustále chlaďiť lietadlo na zemi, čo malo aj negatívne stránky. V prvom rade piloti na vetroňoch museli dlhšie čakať na vlečné lietadlo, čo zapríčiňovalo posunutie plánovaných štartov, kde veľkú rolu hral čas, lebo podmienky na lietanie boli časovo obmedzené. Aby sme dokázali vyriešiť problém, pripravili sme si dva návrhy, kde sme pomocou analýzy vybrali práve jeden ktorý sme aplikovali do praxe. Po úprave chladiacej sústavy na motore sme eliminovali problémy prehrievania, čím sme zvýšili účinnosť nie len chladenia motora ale aj využitie lietadla v prevádzke. Podobným spôsobom dokážeme vyriešiť problém prehrievania aj na ďalších starších modelov WT-9 v rovnakej konfigurácii.

Referencie

- [1] Letová príručka lietadla (no date). Available at: http://www.airportlucenec.sk/dokumenty/studijum/viper_prirucka.pdf (Accessed: 9 October 2024).
- [2] Rotax (2021) 912 ULS | S, Rotax Aircraft Engines. BMK. Available at: <https://www.flyrotax.com/cs/products/912-uls-s> (Accessed: 10 October 2024).
- [3] ROTAX-OWNER.COM (2024) Rotax-owner.com. Available at: <https://www.rotax-owner.com/en/> (Accessed: 21 October 2024).
- [4] MAZÁNÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ V 21.STOLETÍ (no date) Cvut závěrečná práce. Available at: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4788.
- [5] KRÍŽ, Jozef, 2008. POHONNÁ JEDNOTKA. ISBN 978-80-8070-872-6 .
- [6] BEŇO, Luděk, 2022. Letadla. Česká technika - nakladatelství ČVUT: doc. Ing. Luděk Beňo
- [7] PŘÍSLUŠENSTVÍM, S, no date. NÁVOD K OBSLUZE PRO MOTORY ROTAX ŘADY 912 [online]. [cit. 10.december.2024]. Dostupné na: <https://www.aeroklubhb.cz/doc/Rotax-912.pdf>
- [8] AEROWEB.CZ. WT-9 Dynamic – vlečný letoun bez kompromisů - Aeroweb.cz. In: Aeroweb.cz [online] [cit. 06.01.2025]. Dostupné na internete: <https://www.aeroweb.cz/clanky/3029-wt-9-dynamic-vlecný-letoun-bez-kompromisů>
- [9] MANUALSLIB, 2018. Coolant Capacity - Rotax 912 i Series Installation Manual [Page 134]. ManualsLib[online] [cit. 2.január.2025]. Dostupné na: https://www.manualslib.com/manual/1368458/Rotax-912-I-Series.html?page=134&fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTEAAROK4w93QBdN7_sizK5gY3-fzRp17GVyqD0D-SaANayJcKdlwf-sYRha2rY_aem_tJOSL6pH14sBcxcUOVecvA#manual



INOVÁCIA SÚSTAV TUBÍNOVÉHO MOTORA SAFÍR 5 – PALIVOVÁ A MAZACIA SÚSTAVA

Jana Plochová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The thesis focuses on the innovation of the fuel and lubrication systems of the Safir 5 turbine engine, which was used as an auxiliary power unit (APU) as a compressed air generator in the L-39 Albatros aircraft. The main objective of the thesis is to analyse the technical possibilities of modifying this engine to change its original purpose, ensure smooth power regulation, simplify start-up, and increase its reliability. The theoretical part provides a detailed analysis of the operation of turbine engines, the principles of the fuel and lubrication systems of the Safir 5 engine, and their importance for the engine's smooth operation. In the practical part, technical modifications of the fuel and lubrication systems are proposed and implemented, including the construction of a new stand, the design of a fuel tank, and the electrical wiring. The functionality of the modified engine was subsequently verified through a series of tests. The result of the work is a functional and reliable Safir 5 engine with improved parameters, which can serve as a teaching aid or as a basis for further experiments.

Keywords

Turbine engine, auxiliary power unit, Safir 5, fuel system, lubrication system

1. Úvod

Hlavným cieľom práce je analyzovať a navrhnúť technické úpravy palivovej a mazacej sústavy motora Safír 5 tak, aby bolo možné jeho bezpečné a spoľahlivé spustenie a prevádzka mimo lietadla. Dôkladná analýza pôvodného riešenia palivovej a mazacej sústavy motora Safír 5 poskytuje podkladové informácie pre návrh inovácie a technických úprav. Praktická časť práce sa venuje samotnej realizácii navrhovaných úprav. Súčasťou riešenia je konštrukcia nového stojana pre bezpečné uchytenie a manipuláciu s motorom, návrh a výroba samostatnej palivovej nádrže a optimalizácia mazacej a palivovej sústavy. Všetky technické úpravy boli následne overené praktickými testami, ktorých cieľom bolo potvrdiť funkčnosť a spoľahlivosť navrhovaného riešenia. Výsledkom práce je funkčný a spoľahlivý experimentálny motor Safír 5, ktorý umožňuje samostatnú prevádzku mimo leteckého prostredia. Motor je technických úpravách schopný bezpečne štartovať, pracovať v stabilnom režime a reagovať na zmeny výkonu. Takto upravený motor Safír 5 môže slúžiť ako výučbová pomôcka pri praktickej výučbe študentov leteckých odborov, prípadne ako možnosť pre ďalšie technické experimenty.

2. Metodika a metódy skúmania

Primárnym zdrojom pre vypracovanie mojej práce boli internetové zdroje, knižné zdroje, návody a manuály.

Primárne metódy ktoré boli aplikované:

Metóda zberu a spracovania informácií v rámci tejto práce bola aplikovaná na tri hlavné oblasti. Prvou bola analýza dostupných informácií o turbínovom motore Safír 5 a jeho konštrukčných vlastnostiach. Tieto údaje boli získané z odborných kníh a internetových zdrojov. Druhá oblasť sa zameriavala na podrobnú analýzu funkcie palivovej a mazacej sústavy tohto motora, pričom boli využité schémy. Tretia oblasť spočívala v

návrhu a hodnotení technických úprav, ktoré boli založené na zozbieraných dátach.

Metóda analýzy bola v práci aplikovaná v niekoľkých kľúčových oblastiach. Predovšetkým sa využila na analýzu konštrukcie a funkčných vlastností palivovej a mazacej sústavy motora Safír 5. Analýza pomohla odhaliť nedostatky pôvodného návrhu a určiť komponenty, ktoré potrebujú úpravy na zlepšenie výkonu a spoľahlivosti motora.

Metóda syntézy bola v návrhovej časti práce využitá na integráciu poznatkov získaných z analýzy a technických údajov, ktoré viedli k vytvoreniu návrhových schém. Táto metóda umožnila spojenie jednotlivých komponentov palivovej a mazacej sústavy do funkčných celkov, pričom zohľadnila technické požiadavky a operačné podmienky. Syntéza bola konkrétne aplikovaná pri tvorbe upravených schém mazacej a palivovej sústavy.

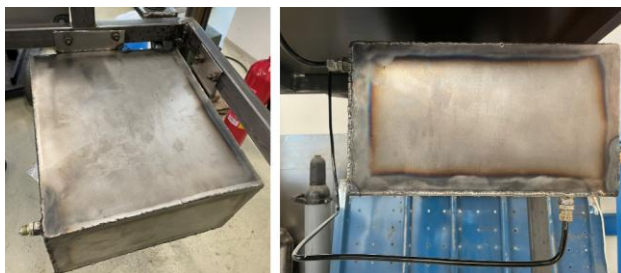
3. Praktická realizácia a overenie funkčnosti upraveného motora

3.1. Palivová sústava

3.1.1. Výroba palivovej nádrže

Palivová nádrž bola navrhnutá tak, aby svojim objemom zabezpečila uskladnenie paliva na minimálne 10 minút chodu motora. Pri výrobe sme využili plech s hrúbkou 2 mm. Rozmery nádrže sú 36 x 40 x 20 cm čo nám poskytne objem 28,8 litrov, respektíve 23 kilogramov JET-A1 ak uvažujeme hustotu 0,8 kg/l. Nádrž disponuje výstupom pre privod paliva do motora, ktorý na nachádza v najnižšom bode nádrže a vstupom pre spätnú vetvu paliva z motora, ktorá sa nachádza na hornej časti nádrže. Výstup a vstup je štandardizovaný na rozmer AN5 (Army-Navy) s vonkajším priemerom 7,9 mm. Nádrž taktiež disponuje

tankovacím hrdlom, pomocou ktorého sa palivo môže dopĺňať do nádrže. Nádrž je pripevnená o rám stojana pomocou dvoch ramien a štyroch skrutiek. Na výrobu nádrže sme použili metódu zvárania TIG.



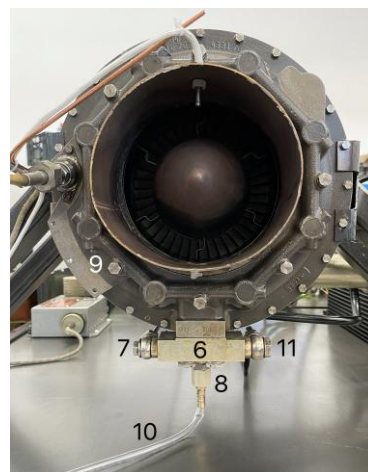
Obrázok 1 Upevnenie palivovej nádrže Zdroj: autor

3.1.2. Zapojenie palivovej sústavy

Palivo je odvádzané z palivovej nádrže do systému pomocou hliníkovej trubky s rozmerom AN5. To následne prechádza cez palivový filter (1) do palivového čerpadla (2). Palivové čerpadlo je napájané pomocou dvoch 12V batérií zapojených do série. Spúšťanie a vypínanie čerpadla riadi obsluha pomocou spínača na ovládacom paneli. Z čerpadla je palivo následne tlačené do palivového regulátora (3) cez hliníkovú trubku s rozmerom AN5. Ten zabezpečuje konštantný prietok paliva na výstupe z regulátora. Palivo následne pokračuje cez hliníkovú trubku s rozmerom AN4 s vonkajším priemerom 6,35 mm do T-spojky (5), ktorá rozdeľuje palivo do rozdeľovača oleja (4) a do drenáže paliva (6), ktorá sa nachádza v zadnej časti motora. Zo spojky sú tiež vedené hliníkové trubky s rozmerom AN4. Drenáž disponuje jedným vstupným otvorom (7) pre prívod paliva a dvoma výstupnými otvormi. Jeden z výstupných otvorov (8) slúži na odvod paliva zo spaľovacej komory v prípade mokrého štartu alebo zostatkového paliva po vypnutí motora v palivovej rampe (9). V drenáži sa nachádzajú guľôčkové ventily. Jeden z ventilov sa zatvorí v prípade tlak paliva v palivovej rampe presiahne 0,14 baru a otvorí sa v prípade že tlak v palivovej rampe klesne pod túto hodnotu. Druhý ventil sa zatvára pri štarte motora keď tlak v spaľovacej komore presiahne hodnotu 0,35 baru a otvorí sa pri vypnutí motora, keď hodnota klesne pod túto hodnotu. Na tento otvor je priskrutkovaný holender na ktorý je napojená hadica (10), ktorá odvádzá palivo do nádoby, aby bolo možné palivo recyklovať. Druhý z výstupných otvorov (11) slúži na odvod paliva do spätnej vetvy. Palivo je odvádzané pomocou hliníkovej trubky s rozmerom AN5 do palivového regulátora.



Obrázok 2 Zapojenie palivovej sústavy Zdroj: autor



Obrázok 3 Zapojenie palivovej sústavy Zdroj: autor

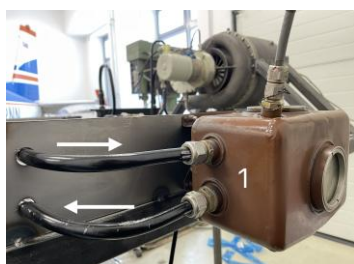
Keďže regulácia výkonu motora Safír 5 pracuje na princípe škrtania spätnej vetvy, vstupuje palivo do servoventilu, ktorý sa nachádza v palivovom regulátore. Pokiaľ do servoventilu nie je privádzaný elektrický prúd, pružina ho vráti do otvorenej polohy. Riadenie servoventilu funguje pomocou modulácie prúdu. My využívame 24V, 150mA a moduláciu šírky impulzu (PWM) s maximálnou frekvenciou 250Hz. Riadiaca jednotka v tomto prípade vytvára prúd zo štvorcovou moduláciou znázornenou na obrázku číslo 44. Pri takomto spôsobe riadenia servoventil kmitá a tým vytvára odpor v spätnej vetve. Čím vyššou frekvenciou kmitá, tým väčší odpor vytvára v spätnej vetve a o to viac paliva sa cez palivovú rampu a palivové dýzy dostáva do spaľovacej komory. V prípade, že servoventil prepúšťa palivo cez spätnú vetvu je odvádzané z palivového

regulátora späť do palivovej nádrže cez hliníkovú trúbku s rozmerom AN5.

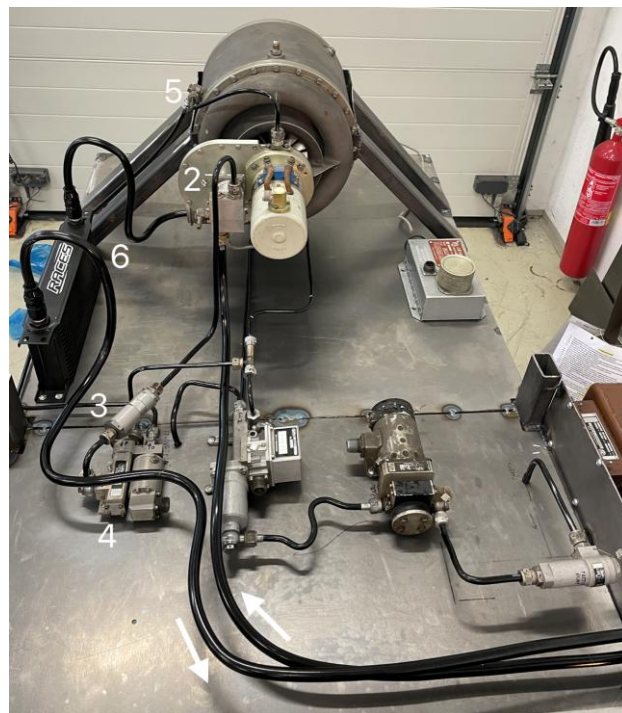
3.2. Mazacia sústava

3.2.1. Zapojenie mazacej sústavy

Na uskladnenie motorového oleja sme využili pôvodnú olejovú nádrž (1) pre Safir 5. Tá nám poskytla dostatočný objem pre uskladnenie oleja a zároveň umožňuje kontrolu hladiny oleja a odvodušňovanie olejovej vetvy. Nádrž sme umiestnili na vonkajší okraj rámu pomocou štyroch skrutiek. Odtiaľ je olej odčerpávaný olejovým čerpadlom (2) cez hliníkové trúbky s rozmerom AN8 s vonkajším priemerom 12,7 mm. Zubové čerpadlo následne tlačí olej cez hliníkovú trúbku s rozmerom AN5 a cez jednosmerný ventil (3) do rozdeľovača oleja (4). Ten pomocou membrány riadi či olej môže, alebo nemôže pretekať ďalej do motora na základe tlaku paliva v palivovom okruhu. Z rozdeľovača oleja je olej tlačенý cez hliníkovú trúbku s rozmerom AN4 a T-spojku (5) do skrine náhonov a do ložísk hriadeľa. Zo skrine náhonov je olej odvádzaný pomocou hliníkovej trúbky s rozmerom AN5 do spoločného uzla, kde sa stretáva spätný olej aj z ložísk hriadeľa. Z uzla je olej odvádzaný pomocou hliníkovej trúbky s rozmerom AN8 cez olejový chladič (6) do olejovej nádrže.

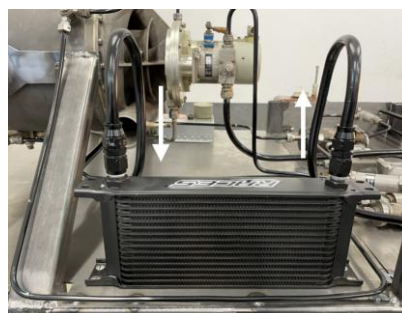


Obrázok 4 Umiestnenie olejovej nádrže Zdroj: autor



Obrázok 5 Zapojenie mazacej sústavy Zdroj: autor

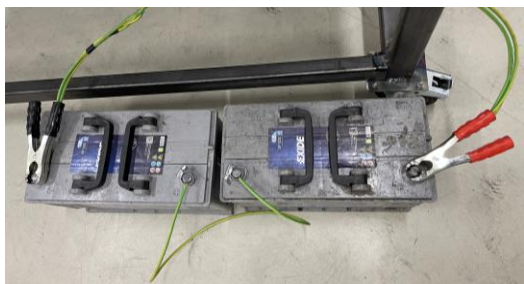
Na chladenie oleja sme využili 16-radový olejový chladič. Výhodou tohto chladiča je, že dokáže zabezpečiť maximálnu účinnosť chladenia pri minimálnom protitlaku. To je pre tento systém dôležité, pretože v spätnej vetve potrebujeme zabezpečiť čo najmenší odpor, keďže systém nedisponuje spätným olejovým čerpadlom.



Obrázok 6 Umiestnenie olejového chladiča Zdroj: autor

3.3. Elektrické zapojenie

Ako zdroj elektrickej energie sme použili dve 12V batérie. Tie sa skladajú zo šiestich článkov s olovenými elektródami a využívajú kyselinu sírovú ako elektrolyt. Výhodou takýchto batérií je veľkosť prúdu, ktorý dokážu poskytnúť. Pri štarte motora totiž využívame prúd 200A pri 24V pre štartér a zapaľovač. Batérie sú medzi sebou prepojené 3,2 mm káblom cez kladný a záporný pól. Následne sú prepojené pomocou krokosvoriek na kábel s priemerom 3,2 mm, ktorý je použitý tri krát kvôli veľkému odberu štartéra a zapaľovača. Dva káble sú použité pre štartér a zapaľovač, a jeden na napájanie zvyšných komponentov.



Obrázok 7 Zdroj elektrickej energie Zdroj: autor

Na štart motora využívame pôvodný elektromotor s jednosmerným prúdom, ktorý pracuje pri 24V a 180A. Motor je štvorpólový so sériovým budením. Zapaľovací zdroj motora Safir 5 využíva 24V a 20A. Prúd dodávaný z batérie je dodávaný do primárneho obvodu zapaľovacieho zdroja a je prerušovaný Wagnerovým kladivkom. Tento prerušovač je premostený primárnym kondenzátorom. Elektrické impulzy vysokého napätia, ktoré vznikajú v sekundárnom vinutí cievky, nabíjajú cez usmerňovač sekundárny kondenzátor. Pokiaľ napätie na sekundárnom kondenzátore dosiahne hodnotu preskokového napätia iskrišťa, vybíja sa tento kondenzátor cez iskrište a nízkonapäťovú sviečku. Po skončení činnosti sa vybíja zvyšný náboj sekundárneho kondenzátora cez zvodový rezistor. Nízkonapäťová sviečka pracuje s povrchovým nábojom na povrchu polovodiča. Pracuje s napätím s 1,9 až 2,6 kV. Štartér a zapaľovač sú spúšťané pomocou 24V relé s maximálnym prúdom 200A. To je spínané pomocou prepínača, respektíve ECU. Relé disponuje dvoma ovládacími konektormi z ktorých záporný pól je napojený na prepínač a ECU pomocou CYKY-J 1,5 mm² káblu. Kladný pól je napojený cez svorkovnicu na kladný pól batérie využitím toho istého typu kábla.

Do štartéra je privádzaný elektrický prúd cez zdvojené 3,2 mm káble, ktoré sú uchytené na svorkách elektromotora. Pri zapájaní sme spojili konce dvoch káblov do tvaru oka a spevnili ich cínom. Rovnaký princíp sme použili aj na svorkách relé. Kladný pól je napojený cez relé na kladný pól batérie a záporný pól je cez svorkovnicu napojený na záporný pól batérie.



Obrázok 8 Privod elektrického prúdu do štartéra Zdroj: autor

Do zapaľovača je privádzaný elektrický prúd cez 2,5 mm² CYKY-J kábel, ktorý sme zvolili kvôli jeho odolnosti voči zmenám teplôt a chemikáliám s ktorými by mohol dôjsť ku kontaktu. Je tiež odolný voči ultrafialovému žiareniu a proti šíreniu plameňa.

Zapaľovač disponuje zásuvkou VŠ 17 B2 Š1 do ktorého sa napája konektor VŠ 17 KPN2G1. Konektor VŠ 17 KPN2G1 bol rozobratý, vyčistený od oxidácie a boli nanovo nacinované vodiče. Odtiaľ vedie kábel do rozbočovacej krabice v ktorej je kladný pól napojený cez relé na kladný pól batérie. Záporný pól je napojený cez svorkovnicu do záporného pólu batérie.



Obrázok 9 Konektor VŠ 17 KPN2G1 a zásuvka VŠ 17 B2 Š1 Zdroj: autor

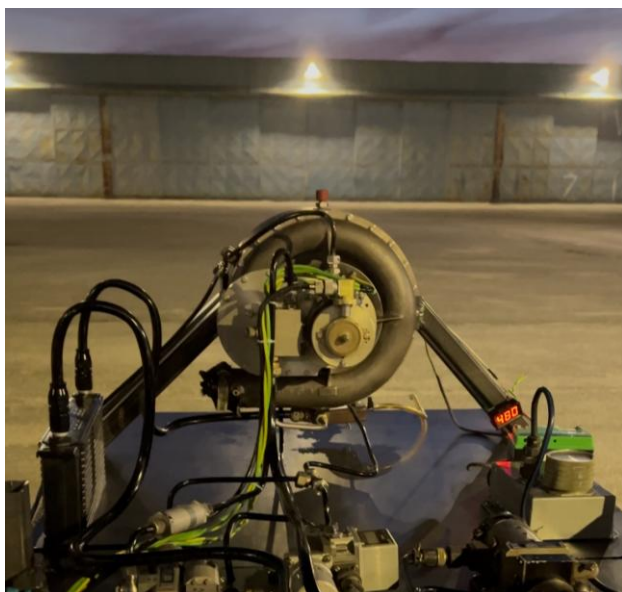
4. Overenie funkčnosti

Pri prvom štarte sme sa stretli s viacerými prevádzkovými problémami. Najzávažnejším problémom bola vysoká teplota výstupných plynov. Palivo v dôsledku nedostatočnej dodávky vzduchu z kompresora nedokázalo v plameni všetko zhorieť a z tohto dôvodu z motora vystupovali plamene. Zmes bola príliš bohatá. Z tohto dôvodu motor tiež nedokázal udržať voľnobežné otáčky a v tom prípade sa dokázal udržať len pri spustenom štartéri. Motor tiež nemal dostatočný tlak za kompresorom, a preto dochádzalo aj k úniku oleja do spaľovacej komory cez labyrintové tesnenia pre ktoré je kritické aby na nich pôsobil tlak vzduchu. Bez tohto tlaku vzduchu nedokážu zabrániť pretečeniu oleja do spaľovacej komory. Ďalší problém s ktorým sme sa stretli bola nefunkčná regulácia výkonu. To sme identifikovali ako dôsledok nesprávnych nastavení v ECU. Čo sa týka ECU, bol tiež nesprávne nakalibrovaný otáčkomer a z tohto dôvodu sme dostávali klamlivé informácie o otáčkach motora. To, že sme dostávali nesprávne informácie o otáčkach motora zapríčinilo že štartovacia sekvencia nepracovala tak ako sme chceli. Štartér so zapaľovačom bol totiž naďalej aktívny aj po prekonaní otáčok pri ktorých sa mali vypnúť.

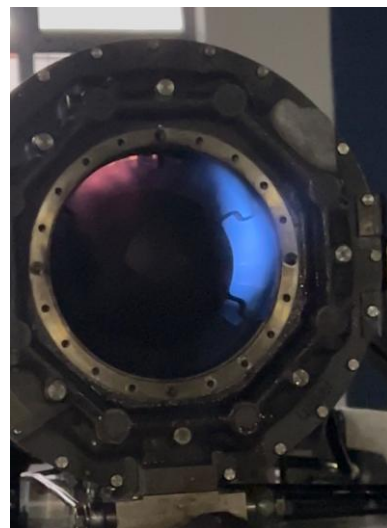
Pred ďalšími štartmi sme museli zabezpečiť správne fungovanie systémov, ktoré zlyhali pri prvom štarte. Ako prvé sme museli zabezpečiť dostatočnú dodávku vzduchu do spaľovacej komory. Dôvod prečo sme nedostávali dostatočný objem vzduchu do spaľovacej komory bol ten, že priveľa vzduchu bolo odpúšťaného z kompresora vplyvom nedostatočného blokovania odvodu pre vzduchový systém motora Safir 5. Pre tento účel sme si vyrobili zátku z izolačnej pásky, ktorá má dobrú odolnosť materiálu pri meniacej sa teplote a je odolná proti roztrhnutiu a opotrebovaniu. To sme vnímali ako výhodu pri cyklickom namáhaní pásky kvôli viacnásobným štartom a vypínaniam motora. Zároveň odolnosť pri meniacej sa teplote nám prišla výhodná, keďže teplota vzduchu z kompresora môže byť rozdielna voči teplote nasávaného vzduchu až do 160 °C vrátane. Táto páska bola po obvode dodatočne prichytená pomocou hadicovej spony. Ďalší problém, ktorý bolo potrebné vyriešiť bola regulácia výkonu motora. To sme upravili nastavením v ECU. Pôvodne sme mali zle nakalibrovanú páku príпустu, ktorú bolo potrebné znovu nakalibrovať. V ECU bolo

tiež nastavené využitie iba 30% výkonu ako maximálne možné nastavenie. To bolo tiež potrebné zmeniť aby sme mohli dosiahnuť vyšších otáčok motora. V ECU bolo tiež nutné znovu nakalibrovať otáčkomer spôsobom zmerania rozmerov zubov a medzier a následným prepočítaním na uhly.

Následnými štartmi sme zistili, že pri úplnom uzavretí odpúšťania vzduchu má motor potrebu väčšieho odberu paliva, aby dokázal udržať voľnobežné otáčky, respektíve tieto voľnobežné otáčky pri takejto konfigurácii sú vyššie ako boli na pôvodnom motore. To sme vyriešili vytvorením otvoru v páske, ktorá blokovala odpúšťanie vzduchu z kompresora. Vďaka jej pružnosti sa pri zvyšujúcom tlaku otvor dokázal zväčšiť a tým mohlo unikáť viac vzduchu z kompresora, a tým sa zabezpečil plynulý chod motora. Aby sme vedeli monitorovať teplotu výstupných plynov lepšie ako len vizuálne, pridali sme do systému aj senzor teploty výstupných plynov s malou obrazovkou na ktorej sa nám zobrazuje teplota. To je kľúčové pre zabezpečenie bezpečnosti prevádzky motora, pretože v prípade príliš vysokých teplôt na prvom alebo na druhom stupni plynovej turbíny by mohlo dôjsť k ulomeniu alebo roztaveniu lopatiek, a tým aj k deštrukcii plynovej turbíny alebo ďalších komponentov motora. Keďže výrobca nepočíta s takýmto využitím motora Safir 5, nemáme prístup k maximálnym teplotám výstupných plynov aké dokážu turbíny spracovať. Preto sme si pri testovaní určili hranicu maximálne 600 °C keďže meriame teplotu až vo výstupnom ústrojenstve za plynovými turbínami.



Obrázok 10 Znáznornenie snímania teploty z výstupného ústrojenstva Zdroj: autor



Obrázok 11 Pohľad na motor zozadu počas prevádzky Zdroj: autor

Po niekoľkých testoch motora sme zabezpečili plynulý a automatický štart. Okrem automatického štartu dokážeme aj regulovať výkon motora v súlade s maximálnou teplotou výstupných plynov. Okrem informácie o teplote výstupných plynov nám ECU poskytuje aj informáciu o otáčkach motora. Toto všetko by však nebolo možné bez toho aby sme zabezpečili pevnú a stabilnú konštrukciu, spoľahlivú mazacu sústavu s chladením oleja a palivovú sústavu s ktorou je regulácia výkonu možná.

5. Záver

Hlavným cieľom práce bolo upraviť motor Safir 5 tak, aby mohol byť použitý ako samostatný funkčný celok, nezávislý od palubných systémov lietadla, s využitím pre výučbové a experimentálne účely. Praktická časť práce sa venovala návrhu a realizácii technických úprav. Kľúčovým krokom bola rekonštrukcia palivovej sústavy, kde bola navrhnutá a zhotovená nová palivová nádrž prispôbená pre samostatnú prevádzku motora. Úpravy zahŕňali aj nový návrh palivovej sústavy, optimalizáciu prívodu a odvodu paliva, ako aj zabezpečenie plynulej regulácie prietoku paliva. Rovnako dôležité boli úpravy mazacej sústavy, kde bol prepracovaný celý okruh mazania a zabezpečené spoľahlivé mazanie všetkých dôležitých častí motora počas celého prevádzkového režimu. Súčasťou realizácie bola aj výroba nového stojana, ktorý zabezpečuje stabilitu motora pri štarte a počas celej prevádzky. Stojan zároveň umožňuje bezpečnú manipuláciu s motorom a jednoduchý prístup k jednotlivým komponentom počas testovania a údržby. Dôležitou etapou bola aj realizácia elektrického zapojenia, ktoré umožňuje štart motora, reguláciu jeho výkonu, ako aj monitorovanie základných prevádzkových parametrov. Po ukončení všetkých technických úprav bola vykonaná séria praktických testov zameraná na overenie funkčnosti celého systému. Testovanie potvrdilo, že navrhnuté a realizované úpravy umožňujú bezproblémový štart motora, jeho stabilný chod, plynulú reguláciu otáčok a spoľahlivú funkciu palivovej a mazacej sústavy. Výsledkom diplomovej práce je funkčný a samostatne prevádzkovateľný systém turbínového motora Safir 5, ktorý je pripravený na ďalšie využitie. Vďaka realizovaným

úpravám môže slúžiť ako výučbová pomôcka pri vzdelávaní študentov leteckých odborov, kde umožní názorné oboznámenie sa s princípmi fungovania turbínových motorov, ich palivových a mazacích sústav, ako aj s procesom ich spúšťania a regulácie. Realizácia tejto práce zároveň preukázala, že aj starší letecký motor je možné modernizovať a plnohodnotne využiť v nových podmienkach, čím sa predlžuje jeho životnosť a zvyšuje jeho prínos pre technickú prax. Práca tak spája teoretické poznatky s praktickým riešením a ponúka využiteľný výsledok, ktorý môže nájsť uplatnenie v oblasti technického vzdelávania a výskumu.

Referencie

- [1] Nauka spouštěcí jednotky SAPHIR 5. 2. vyd. Piešťany, 1975. 290 s.
- [2] 16 radový olejový chladič. In: race-shop.sk [online] [cit. 12.04.2025]. Dostupné na internete: https://race-shop.sk/univerzalne-olejove-chladice/45430-16-radovy-olejovy-chladic-330x125x50mm.html#/1559-vstup_a_vystup-an8/163-farba-cierna
- [3] BATTERY IMPORT SK. VŠETKO O AUTOBATÉRII - Battery Import SK. In: battery-import.sk [online] [cit. 12.04.2025]. Dostupné na internete: <https://www.battery-import.sk/vsetko-o-autobaterii/>
- [4] Cyky káble: Aké majú označenie a ktoré kedy použiť? (blog). In: Murat.sk [online] [cit. 12.04.2025]. Dostupné na internete: <https://www.murat.sk/blog/cyky-kable-ake-maju-oznacenie-a-ktore-kedy-pouzit>



OVERENIE METODIKY MERANIA POKLESU VÝKONNOSTI PRI ÚNAVE

Timotej Rimarčík
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Branislav Kandra
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Fatigue is a critical factor in aviation safety, contributing significantly to human error. This study aimed to validate a methodology for measuring performance decline due to fatigue, using both objective and subjective approaches. Eight university students participated in a two-day measurement involving psychomotor vigilance tests (PVT) for reaction time and self-assessment on the Karolinska Sleepiness Scale. Sleep duration was reduced to induce acute sleep disruption. Results demonstrated a measurable decline in cognitive performance, particularly on the second day following reduced sleep. A moderate positive correlation was found between subjective and objective measurements, confirming the validity of the dual-measurement approach. The study highlights the negative impact of sleep deprivation on performance and supports the methodology's potential use in human performance education within aviation.

Keywords

Fatigue, Sleep, Psychomotor vigilance task, Karolinska sleepiness scale

1. Úvod

Jedným z najdôležitejších aspektov obchodnej leteckej dopravy je nepretržité monitorovanie a zlepšovanie bezpečnosti. Štúdium ľudského faktora má v tomto procese mimoriadny význam, pretože väčšina leteckých nehôd je spôsobená chybou na strane človeka. Práca letových posádok má svoje prevádzkové špecifiká, ktoré môžu ovplyvňovať ich fyzický a psychický stav. Únava je v tomto ohľade podstatným faktorom a jej negatívny vplyv na výkonnosť posádok môže viesť k robeniu chýb.

Pojem únava figuruje v rôznych oblastiach a jej definícia je v jednotlivých štúdiách upravovaná podľa konkrétneho predmetu skúmania. Odborné články sa zaoberajú znižovaním výkonnosti človeka vplyvom únavy, vplyvom prostredia a konzumácie na únavu, alebo únavou spojenou so somatickými a psychickými poruchami. [1]

Z výhradne fyziologického hľadiska je únava definovaná ako funkčné zlyhanie orgánu spojené s nadmernou spotrebou energie. Medzi príčiny patrí horúčka, infekcia, anémia, poruchy spánku alebo tehotenstvo. [2] Z psychologického hľadiska vyjadruje únava stav vyčerpania a zníženej motivácie vplyvom dlhotrvajúcej mentálnej aktivity alebo unudenosti pri pôsobení chronického stresu, úzkosti, alebo depresie. [3] Vo všeobecnosti je však únava komplexný syndróm, ktorý zažívajú nielen jedinci so zdravotnými problémami, ale aj zdraví jedinci a prejavuje sa súčasne fyziologicky a psychologicky. [4]

Pojem vyčerpanosť je zvyčajne používaný ako prejav únavy, ktorý vyjadruje slabosť a nedostatok energie. Únava a vyčerpanosť sú však často zamieňané pojmy, pričom autori lekárskej a psychologickej literatúry uprednostňujú pojem únava. [5]

Tento článok je zameraný na overenie metodiky merania únavy a poklesu výkonnosti pri únave, ktoré by mohlo pomôcť

pochopiť vplyv únavy na človeka v rámci výučby predmetu ľudský faktor. Overenie metodiky merania poklesu výkonnosti pri únave je uskutočnené pomocou dostupných spôsobov objektívneho a subjektívneho merania. Pomocou štatistického spracovania výsledkov bude zisťovaný vplyv akútneho narušenia spánku na výkonnosť účastníkov a sledovaná bude aj korelácia medzi oboma spôsobmi použitými pri meraní.

2. Metodika merania

Únavu síce nie je možné merať priamo, existuje však viacero prejavov únavy, ktoré je možné merať. Pre tento účel boli zvolené také metódy merania, ktoré sú overené, dostupné a praktické. Pri objektívnom meraní sa jedná o meranie reakčného času pomocou programu PVT, subjektívne meranie je založené na Karolinskej stupnici ospalosti.

Aby bolo možné sledovať vplyv poklesu výkonnosti pri skrátení trvania spánku, bolo trvanie merania nastavené na 2 dni. V noci pred prvým dňom sa mali účastníci plnohodnotne vyspať, pred druhým dňom merania bol však ich spánok skrátený o približne 2 hodiny. Takéto skrátenie bolo pri viacerých nehodách vyhodnotené ako akútne narušenie spánku. Počas druhého dňa sú vplyvom únavy očakávané horšie výsledky, čo by malo lepšie odzrkadľovať vplyv únavy, keďže potenciálny vplyv zlepšenia sa účastníkov vďaka praxi by bol opačný.

Aby bolo možné sledovať zmeny výkonnosti v priebehu dňa, bolo stanovených 5 časov denne, v ktorých si mali účastníci vykonať merania, vždy objektívne spolu so subjektívnym. Poradie stanovených časov bolo číselne označené od 1 do 10 nasledovne:

1. 9:00, prvý deň
2. 12:00, prvý deň
3. 15:00, prvý deň

4. 18:00, prvý deň
5. 21:00, prvý deň
6. 9:00, druhý deň
7. 12:00, druhý deň
8. 15:00, druhý deň
9. 18:00, druhý deň
10. 21:00, druhý deň

Keďže meranie prebiehalo počas dvoch dní v širokom časovom rozmedzí, vykonávali ho účastníci individuálne pomocou vlastného počítača a sami zodpovedali za svoje odpovede a namerané výsledky. Meranie bolo uskutočnené v súlade s etickým kódexom Žilinskej univerzity v Žiline.

2.1. Účastníci

Merania sa dobrovoľne zúčastnilo 8 vysokoškolských študentov. Jednalo sa o 4 mužov a 4 ženy vo veku od 21 do 25 rokov. Postup merania bol účastníkom vopred vysvetlený, následne získali prístup k dotazníku cez ktorý posielali svoje odpovede. Dotazník zároveň obsahoval všetky potrebné inštrukcie.

Aby bolo pri meraní možné sledovať prirodzený vývoj únavy, museli sa účastníci počas svojej účasti riadiť niekoľkými zásadami:

- žiadny príjem kofeínu (v akejkoľvek forme),
- žiadna konzumácia alkoholu,
- žiadne zdriemnutia počas dňa,
- vyhýbať sa veľkej fyzickej námahe,
- odpovedať úprimne a snažiť sa o čo najlepšie reakčné časy.

2.2. Objektívne meranie

Meranie prebiehalo pomocou psychomotorického testu bdlosti (PVT). Tento test je jednoduchý a praktický nástroj vyžadujúci neustálu pozornosť počas zvolenej doby. Počas testu sa na obrazovke v náhodných intervaloch zjaví podnet (odpočet), na ktorý je potrebné reagovať stlačením tlačidla. Primárnym výstupom testu sú reakčné časy, pomocou ktorých je možné posúdiť kognitívnu výkonnosť. Okrem reakčného času môže byť výstupom testu aj počet oneskorených reakcií, ale vzhľadom na ich malý počet neboli oneskorené reakcie v tomto článku skúmané. [6]

Štandardná doba testu je 10 minút, pre potreby tohto merania bola táto doba skrátená na 5 minút. Meranie síce môže byť menej citlivé, avšak aj táto doba dokáže poskytnúť dostatočne spoľahlivé výsledky. [6] Aby si mohli účastníci robiť merania individuálne, bola im poskytnutá webová stránka s testom PVT, ktorá umožňovala export nameraných dát.

2.3. Subjektívne meranie

Toto meranie prebiehalo jednoduchým vyhodnotením svojho pocitu ospalosti na Karolinskej stupnici ospalosti. Pri výskumoch

bola dokázaná významná korelácia medzi hodnotením na tejto stupnici a výkonnosťou pri šoférovaní, či EEG indikátormi ospalosti. [7] Ospalosť je hodnotená na 9 stupňoch a každý z nich má príslušnú hodnotu:

1. Extrémne ostražitý
2. Veľmi ostražitý
3. Ostražitý
4. Skôr ostražitý
5. Ani ostražitý, ani ospalý
6. Nejaké známky ospalosti
7. Ospalý, ale bez snahy ostať bdely
8. Ospalý, s určitou snahou ostať bdely
9. Ospalý s veľkou snahou ostať bdely (bojujem so spánkom)

2.4. Spánkový záznam

Od účastníkov bolo požadované, aby bola doba ich spánku pred prvým dňom merania dostatočne dlhá pre čo najlepší odpočinok a pred druhým dňom merania si mali túto dobu skrátiť o približne 2 hodiny. Spánok ale môže byť nevyspytateľný a preto si účastníci počas oboch dní pred prvým meraním vyplnili spánkový záznam, ktorý mal potvrdiť požadovaný priebeh spánku. Dotazník sa zaoberal časom zaspávania, časom vstávania, trvaním zaspávania, prerušovaním spánku a subjektívnym hodnotením kvality spánku.

Trvanie spánku účastníkov počas prvej noci bolo v rozmedzí 7,5 až 9 hodín, trvanie spánku počas druhej noci bolo v rozmedzí 4 až 6,75 hodín. Rozdiel medzi prvou a druhou nocou bol u všetkých účastníkov dostatočný, u siedmich účastníkov bol tento rozdiel 1,5 až 3-hodinový, u jedného účastníka dokonca až 5-hodinový. Napriek väčšiemu skráteniu spánku sú vo výsledkoch zahrnuté aj merania tohto účastníka. Kvalitu spánku ohodnotili 3 účastníci rovnako počas oboch nocí a 5 účastníkov ohodnotilo kvalitu spánku počas druhej noci horšie. Spánkový záznam u všetkých účastníkov potvrdil dostatočné akútne narušenie spánku počas druhej noci.

3. Výsledky merania

Pri spracovaní reakčných časov nameraných pomocou testu PVT bolo zaznamenaných niekoľko odľahlých hodnôt, ktoré bolo potrebné odstrániť. Odľahlé nízke hodnoty (napríklad 30 ms) predstavovali očakávanie podnetu, keďže takáto rýchlosť reakcie by bola nereálna. Pri odľahlých vysokých hodnotách sa mohlo jednať o chybu účastníka. Zo zvyšných hodnôt boli vypočítané stredné hodnoty v milisekundách (označené ako Q_2), pretože aritmetické priemery by mohli byť skreslené oneskorenými reakciami.

Tabuľka 1 Hodnoty Q_2 a ich priemer

Poradie merania	Účastník								Priemer (bez B)
	A	(B)	C	D	E	F	G	H	
1.	237	304	287	283,5	274	310	295,5	253	277,14
2.	239	300	285	299	283	307,5	296,5	256	280,86
3.	236,5	294	283	318	287	282	290,5	261	279,71
4.	231,5	344	300,5	327	282,5	308	291	242	283,21
5.	241,5	314	282	354	292	282,5	292	273,5	288,21
6.	226	543	290	314	286	303	300	274	284,71
7.	234	425	279	343	303	298	318	271,5	292,36
8.	247	424	302,5	339	288	292	341	270	297,07
9.	247	440	298,5	360	297	282	346	271	300,21
10.	252	358	301,5	350	307	283	311,5	286,5	298,79

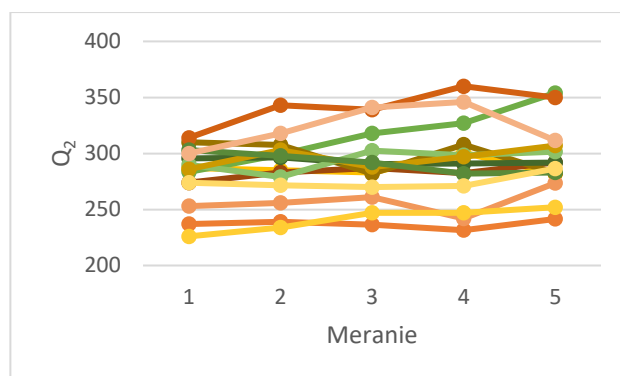
Tabuľka 2 Subjektívne merania vyjadrené na Karolinskej stupnici ospalosti a ich priemer

Poradie merania	Účastník								Priemer (bez B)
	A	(B)	C	D	E	F	G	H	
1.	4	3	5	3	3	5	3	3	3,7
2.	5	4	5	3	3	5	4	3	4,0
3.	7	2	4	4	4	3	5	3	4,3
4.	4	4	6	3	3	6	5	4	4,4
5.	5	4	8	5	5	4	8	6	5,9
6.	3	5	5	3	4	6	4	5	4,3
7.	5	5	4	6	4	4	5	3	4,4
8.	6	6	6	6	5	3	7	4	5,3
9.	6	7	7	5	6	3	8	3	5,4
10.	6	6	8	7	7	4	8	6	6,6

Rozdiely medzi strednými hodnotami reakčných časov medzi účastníkmi môžu byť spôsobené rozdielnymi schopnosťami a rozdielmi v technike. Pri 6. meraní účastníka B bol zaznamenaný veľký nárast Q_2 oproti predchádzajúcim meraniam, vysoké hodnoty mali aj 3 nasledujúce merania. Pri ostatných účastníkoch boli rozdiely medzi meraniami výrazne citlivejšie, mohlo teda dôjsť k chybnému meraniu u účastníka B preto nie je zahrnutý vo výsledkoch merania.

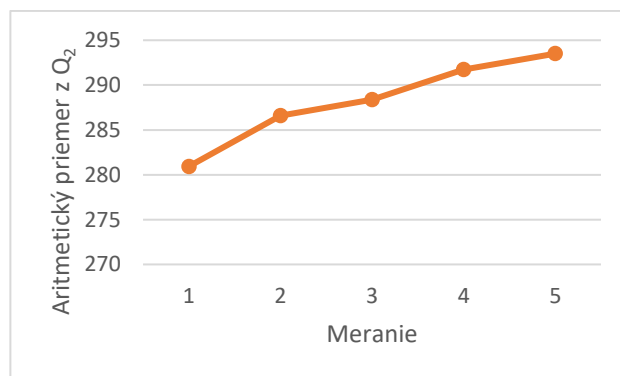
3.1. Zmena výkonnosti v priebehu dňa

Pri sledovaní zmien vo výkonnosti v priebehu dňa je využité objektívne meranie. Na obrázku 7 je grafické znázornenie hodnôt Q_2 za všetky merané dni, pri siedmich účastníkoch to bolo 14 dní. Jednotlivé línie teda znázorňujú priebeh všetkých meraných dní od 9:00 do 21:00.



Obrázok 1 Grafické znázornenie hodnôt Q_2 za jednotlivé dni

Jednotlivé merané dni mali rôzne priebehy. Lepší obraz o celkovej zmene výkonnosti môže poskytnúť priebeh dňa, vytvorený z aritmetických priemerov z Q_2 za všetky merané dni.

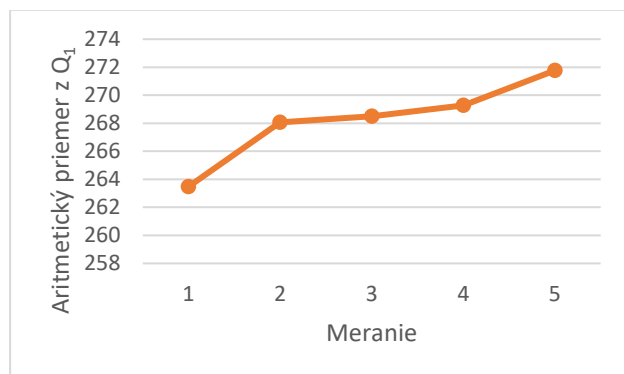


Obrázok 2 Grafické znázornenie priemerných hodnôt Q_2 počas dňa

Priemerné hodnoty Q_2 počas dňa majú súvislý rastúci priebeh, čo vyjadruje pokles výkonnosti počas dňa. Tento pokles výkonnosti môže súvisieť práve s narastajúcou únavou. Na grafe nebola zaznamenaná sekundárna ospalosť, po ktorej by nasledovalo zlepšenie výkonnosti v podvečerných hodinách.

Pre potvrdenie rastúcej únavy počas dňa bolo vytvorené ďalšie grafické znázornenie. Namiesto hodnoty Q_2 boli priemery vytvorené z hodnôt dolného kvartilu jednotlivých meraní bez odľahlých hodnôt v milisekundách (označené ako Q_1). Hodnota Q_1 je teda namiesto strednej hodnoty založená na dolnom

kvartile a predstavuje hranicu 25% najrýchlejších reakčných časov.

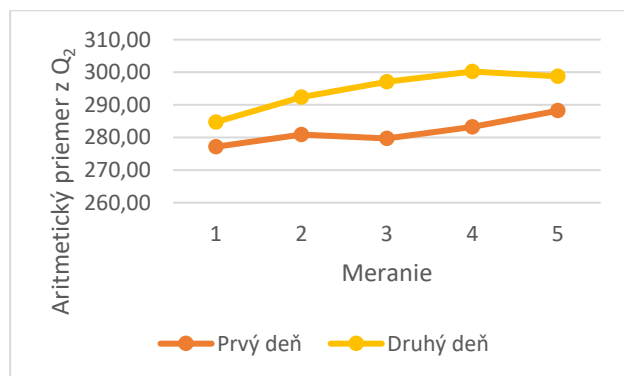


Obrázok 3 Grafické znázornenie priemerných hodnôt Q_1 počas dňa

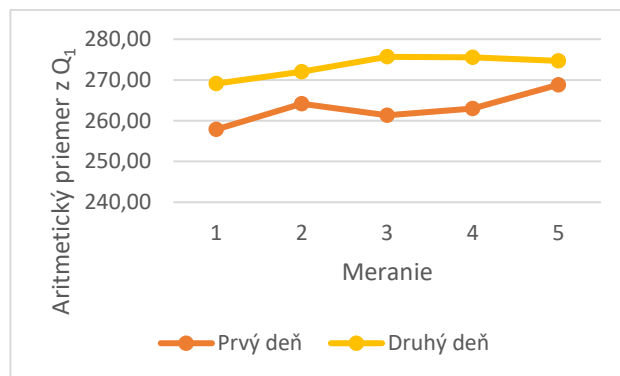
Priemerné hodnoty Q_1 potvrdili pokles výkonnosti, aj keď grafické znázornenie nemalo taký súvislý priebeh ako pri hodnotách Q_2 . Pri overovaní metodiky sa teda podarilo zaznamenať pokles výkonnosti v priebehu dňa. Sekundárna ospalosť nebola zaznamenaná, príčinou môže byť veľký časový interval medzi meraniami.

3.2. Pokles výkonnosti pri akútnom narušení spánku

Sledovanie poklesu výkonnosti pri akútnom narušení spánku je tiež založené na objektívnom meraní. Priemerné hodnoty grafického znázornenia na obrázku 10 sú vytvorené z Q_2 samostatne počas prvého a druhého dňa. Rovnakým spôsobom je vytvorené aj znázornenie na obrázku 11, avšak priemerné hodnoty sú vytvorené z Q_1 .



Obrázok 4 Grafické znázornenie priemerných hodnôt Q_2 počas prvého a druhého dňa



Obrázok 5 Grafické znázornenie priemerných hodnôt Q_1 počas prvého a druhého dňa

Priemery reakčných časov vytvorené cez parametre Q_2 a Q_1 indikujú pomalšie reakčné časy účastníkov počas druhého dňa. Namerané hodnoty teda zaznamenali zhoršenú výkonnosť pri akútnom narušení spánku, ktorému museli účastníci počas druhého dňa čeliť. Toto zhoršenie bolo zaznamenané vo všetkých stanovených časoch merania, najväčšie zhoršenie výkonnosti bolo pri meraniach o 15:00 a 18:00. Jednoznačné zhoršenie výkonnosti u pomerne malého počtu účastníkov iba zdôrazňuje negatívny vplyv akútneho narušenia spánku na kognitívnu výkonnosť.

3.3. Korelácia medzi objektívnym a subjektívnym meraním únavy

Dosiaľ bol v meraniach preukázaný vplyv únavy na reakčný čas počas testu PVT, zároveň však boli účastníci zapojení aj do subjektívneho merania kde hodnotili svoj pocit ospalosti. Pokiaľ dokázali účastníci správne odhadnúť svoju ospalosť, malo by byť možné nájsť koreláciu medzi objektívnym a subjektívnym meraním.

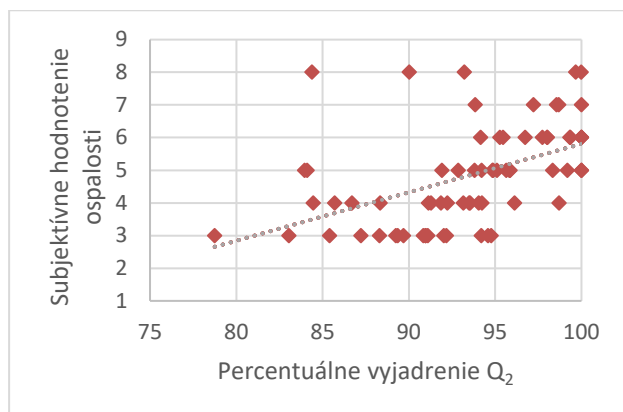
Hodnoty Q_2 sú vhodným výstupom objektívneho merania, nevýhodou však je, že hodnoty jednotlivých účastníkov sa pohybovali na rôznych úrovniach. V tomto prípade nie je možné použiť aritmetický priemer Q_2 , pretože koreláciu je potrebné hľadať medzi individuálnymi meraniami. Riešením bola premena hodnôt Q_2 na percentuálne vyjadrenie vzhľadom na maximálnu hodnotu jednotlivých účastníkov.

Tabuľka 3 Percentuálne vyjadrenie hodnôt Q_2 vzhľadom na maximum jednotlivých účastníkov

Poradie merania	Účastník						
	A	C	D	E	F	G	H
1.	94,05	94,88	78,75	89,25	100,00	85,40	88,31
2.	94,84	94,21	83,06	92,18	99,19	85,69	89,35
3.	93,85	93,55	88,33	93,49	90,97	83,96	91,10
4.	91,87	99,34	90,83	92,02	99,35	84,10	84,47
5.	95,83	93,22	98,33	95,11	91,13	84,39	95,46

6.	89,68	95,87	87,22	93,16	97,74	86,71	95,64
7.	92,86	92,23	95,28	98,70	96,13	91,91	94,76
8.	98,02	100,00	94,17	93,81	94,19	98,55	94,24
9.	98,02	98,68	100,00	96,74	90,97	100,00	94,59
10.	100,00	99,67	97,22	100,00	91,29	90,03	100,00

Výstupom subjektívneho merania boli hodnoty od 1 do 9 vyjadrujúce stupeň ospalosti, ktoré sú uvedené v tabuľke 5. Tieto hodnoty mohli byť priamo porovnávané s percentuálnymi vyjadreniami Q_2 .



Obrázok 6 Bodový graf závislosti subjektívnych a objektívnych meraní so znázornenou priamkou lineárnej regresie

Grafická analýza odhaľuje určitú koreláciu medzi subjektívnym a objektívnym meraním, keďže poloha najväčšej hustoty bodov má rastúci trend. Sila lineárnej závislosti je následne skúmaná pomocou Pearsonovho korelačného koeficientu.

Výsledná hodnota koeficientu lineárnej korelácie má hodnotu 0,488. Keďže má koeficient kladnú hodnotu, jedná sa o priamu závislosť. To znamená, že s rastúcou ospalosťou rastie reakčný čas. Hodnota koeficientu vyjadruje silu závislosti, pričom čím je absolútna hodnota koeficientu bližšie k 1, tým silnejšia je závislosť. Koeficient 0,488 označuje stredne silnú závislosť.

Následne bol ešte vykonaný test významnosti korelačného koeficientu. Pred testom bola definovaná hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Pri teste významnosti bola vypočítaná p-hodnota = $1,859 \cdot 10^{-5}$. Keďže je p-hodnota menšia ako α , nejedná sa o náhodný jav, ale o významnú závislosť. Overenie metodiky teda odhalilo významnú, stredne silnú koreláciu medzi objektívnym a subjektívnym meraním únavy.

4. Záver

Overenie metodiky prebiehalo pomocou jednoduchých a dostupných spôsobov merania únavy, vďaka čomu by bolo meranie možné jednoducho replikovať. Napriek pomerne malému počtu účastníkov bol vo výsledkoch merania

spozorovaný vplyv únavy, ktorý ovplyvňoval výsledky v súlade s teoretickými poznatkami o únave. Výkonnosť účastníkov sa znižovala v priebehu dňa, výrazne sa znížila aj po akútnom narušení spánku. Zaznamenaný pokles výkonnosti zdôrazňuje veľkosť vplyvu únavy na výkonnosť a význam zabraňovania vzniku únavy u letových posádok. Vo výsledkoch merania bola taktiež potvrdená korelácia medzi subjektívnym a objektívnym meraním.

Overenie metodiky môže pomôcť pri výučbe predmetu ľudský faktor. Pokiaľ by boli študenti v rámci cvičení podrobení takémuto meraniu, mohlo by to zlepšiť ich pochopenie vplyvu únavy na jedinca. Pre zvýšenie kvality merania v budúcnosti je odporúčané poskytnúť všetkým účastníkom rovnaký hardvér, aby sa predišlo chybám a rozdielnemu oneskoreniu. Kvalitu merania by zlepšil aj väčší počet účastníkov a väčší počet meraní v priebehu dňa.

Referencie

- [1] BAROFSKY, I. – LEGRO, M. W. 1991. *Definition and Measurement of Fatigue*. In: Reviews of Infectious Diseases. 1991, roč. 13, č. 1, s. 94-97. ISSN 0162-0886.
- [2] AARONSON, L. S. a kol. 1999. *Defining and Measuring Fatigue*. In: Image the Journal of Nursing Scholarship. 1999, roč. 31, č. 1, s. 45-50. ISSN 0743-5150.
- [3] LEE, K. A. a kol. 1991. *Validity and reliability of a scale to assess fatigue*. In: Psychiatry Research. 1991, roč. 36, č. 3, s. 291-298. ISSN 1872-7123.
- [4] BILLONES, R. a kol. 2021. *Dissecting the fatigue experience: A scoping review of fatigue definitions, dimensions, and measures in non-oncologic medical conditions*. In: Brain, Behavior, & Immunity – Health. 2021, roč. 15. ISSN 2666-3546.
- [5] NECKEL, S. – SCHAFFNER, A. K. – WAGNER, G. 2017. *Burnout, Fatigue, Exhaustion: An Interdisciplinary Perspective on a Modern Affliction*. Cham: Springer Nature, 2017. 316 s. ISBN 978-3-319-52887-8.
- [6] LOH, S. a kol. 2004. *The validity of psychomotor vigilance tasks of less than 10-minute duration*. In: Behavior Research Methods, Instruments, & Computers. 2004, roč. 36, č. 2, s. 339-346. ISSN 1532-5970.
- [7] ÅKERSTEDT, T. a kol. 2014. *Subjective sleepiness is a sensitive indicator of insufficient sleep and impaired waking function*. In: Journal of Sleep Research. 2014, roč. 23, s. 242-254. ISSN 1365-2869.



VYUŽITIE SATELITNEJ NAVIGÁCIE BEZPILOTNÝMI PROSTRIEDKAMI

Jakub Rychvalský
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Branislav Kandra
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This thesis investigates the application of satellite navigation in unmanned aerial vehicles (UAVs), with a focus on the influence of urban environments on navigation accuracy. The research analyzes the effects of signal obstruction caused by buildings and other structures, leading to positioning deviations. The experimental part involves real-world drone flights in urban areas, comparing the performance of UAVs equipped with standard and advanced GNSS receivers. Results demonstrated significant signal degradation in both cases, adversely affecting navigation precision. The thesis concludes by proposing mitigation strategies, including the integration of multiple GNSS constellations, pre-flight monitoring of satellite availability and geomagnetic conditions, the use of multipath-resistant antennas, and the adoption of AI-enhanced navigation systems.

Keywords

Satellite navigation, Unmanned aerial vehicles, Navigation accuracy, Global Navigation Satellite Systems

1. Úvod

Článok sa zaoberá využitím satelitnej navigácie v bezpilotných prostriedkoch (UAV) a vplyvom zastavaného prostredia na jej presnosť. Satelitné systémy ako GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou umožňujú autonómne operácie dronov, no v mestách dochádza k strate signálu a pozičným chybám. Praktická časť práce experimentálne overuje, ako budovy ovplyvňujú navigáciu dronov. Výsledky poukazujú na potrebu spoľahlivejších riešení pre bezpečnú prevádzku UAV v mestských podmienkach a navrhujú opatrenia na zlepšenie navigácie.

2. Teoretický úvod riešenej problematiky

Globálne navigačné satelitné systémy (GNSS - Global Navigation Satellite System) tvoria základ pre navigáciu založenú na výkonnosti (PBN - Performance-based Navigation). Tieto systémy zabezpečujú bezproblémové, a efektívne riadenie nie len lietadla od momentu odletu až po priblíženie [1].

Globálny satelitný navigačný systém predstavuje súbor satelitných systémov, ktoré vysielať signály z vesmíru na určenie polohy v priestore a čase. Tento systém je nevyhnutný pre modernú navigáciu a lokalizáciu a zahŕňa rôzne národné systémy, medzi ktoré patrí:

- GPS (Global Positioning System) – USA
- Galileo - Európska únia
- GLONASS – Rusko
- BeiDou – Čína [1][2]

2.1. Globálny polohový systém - GPS

Globálny polohový systém, známy pod skratkou GPS (Global Positioning System), je sofistikovaný navigačný systém, ktorý umožňuje určiť polohu na Zemi aj vo vesmíre. Tento systém bol

vyvinutý americkou armádou a jeho primárnym cieľom je poskytovať presné údaje o polohe, rýchlosti a čase [3].

Segmenty globálneho polohového systému - GPS

Kozmická zložka - družice: Systém GPS sa skladá z 24 družíc, z ktorých 21 je aktívnych a 3 slúžia ako záložné. Tieto družice sú umiestnené na šiestich obežných dráhach vo výške približne 20 200 km nad zemským povrchom a obiehajú našu planétu každých približne 12 hodín. Vysielať signály, ktoré obsahujú presný čas a ich polohu, čo je kľúčové pre určenie polohy prijímača na Zemi [9][10].

Riadiaca zložka - monitorovacie stanice: Tento segment zahŕňa hlavnú riadiacu stanicu a štyri monitorovacie pozemné stanice rozmiestnené po celom svete. Hlavná riadiaca stanica sa nachádza v Colorade, USA. Jej úlohou je sledovať a riadiť činnosť družíc, aktualizovať navigačné informácie a zabezpečiť presnosť časových údajov v družiciach [9][10].

Užívateľská zložka - GPS prijímače: Tieto zariadenia prijímajú signály z družíc a vykonávajú výpočty na určenie polohy, rýchlosti a času. Na presné určenie polohy je potrebné prijímať signály minimálne zo štyroch družíc súčasne aby určili presnú polohu používateľa v trojrozmernom priestore (X, Y, Z). Prijímače môžu byť jednokanálové alebo viackanálové [9][10].

2.2. Galileo

Galileo je celosvetový navigačný systém, ktorý bol vyvinutý Európskou úniou s cieľom ponúknuť presnejšie a spoľahlivejšie navigačné služby v porovnaní s existujúcimi systémami, ako sú americké GPS a ruské GLONASS. Tento systém je určený na civilné využitie a je riadený civilnými autoritami, čo zabezpečuje jeho nezávislosť od vojenských aplikácií. Galileo je pod civilnou kontrolou a jeho služby sú dostupné od roku 2016 [12].

Segmenty navigačného systému Galileo

Vesmírny segment – družice: Systém Galileo sa skladá z 30 družíc, ktoré sú rozmiestnené na troch obehových dráhach vo výške približne 23222 km nad zemou. Každá dráha obsahuje 10 družíc, pričom jedna z nich funguje ako záložná. Družice majú sklon dráhy 56° voči rovníku a sú navrhnuté tak, aby zabezpečili optimálne pokrytie signálom, predovšetkým v severných oblastiach Európy [16][17].

Pozemný segment – monitorovacie stanice: Tento segment pozostáva z monitorovacích staníc, ktoré sledujú a kontrolujú družice, a z kontrolných centier, ktoré riadia operácie systému. Hlavné riadiace centrum sa nachádza v Taliansku, zatiaľ čo administratívne centrum bolo presunuté do Prahy [16][17].

Užívateľský segment – prijímače: Užívateľský segment zahŕňa zariadenia a prijímače, ktoré sú schopné komunikovať so systémom Galileo. Tieto zariadenia budú schopné prijímať signály nielen z Galilea, ale aj z iných navigačných systémov, ako sú GPS a GLONASS [16][17].

2.3. GLONASS

Predstavuje ruský satelitný navigačný systém, ktorý funguje ako alternatíva k americkému GPS. Jeho vývoj sa začal v 70. rokoch 20. storočia, pričom prvý testovací satelit bol vypustený v roku 1982. Po rozpade Sovietskeho zväzu sa systém stretol s rôznymi problémami a jeho obnova sa začala v roku 2001. Plná operačná schopnosť bola dosiahnutá v októbri 2011 [20].

Segmenty navigačného systému Glonass

Vesmírny segment – družice: Pozostáva z družíc, ktoré obiehajú okolo Zeme. V prípade systému GLONASS sa využíva 24 satelitov rozmiestnených na troch orbitálnych rovinách. Každá z týchto rovín je naklonená pod uhlom 64,8 stupňa a nachádza sa približne 19 100 kilometrov nad povrchom Zeme. V rámci každej orbitálnej roviny je umiestnených osem satelitov, ktoré sú symetricky rozložené v intervaloch po 45 stupňoch, čím sa zabezpečuje nepretržité pokrytie. Satelity dokončujú obežnú dráhu za približne 11 hodín a 15 minút, čo je kratší čas v porovnaní so satelitmi GPS, kvôli ich nižšej nadmorskej výške. Systém poskytuje presnosť určovania polohy v rozmedzí od 4,5 do 7 metrov [21].

Riadiaci segment – monitorovacie stanice: Zodpovednosť za monitorovanie a správu satelitov majú monitorovacie stanice. Skladajú sa zo siete pozemných monitorovacích staníc, ktoré sú prevažne umiestnené v Rusku, pričom centrálna kontrolná stanica sa nachádza v Krasnoznamensku neďaleko Moskvy [21].

Používateľský segment – prijímače: Zahŕňa prijímače, ktoré zachytávajú signály zo satelitov GLONASS. Na rozdiel od GPS prijímačov, ktoré obvykle fungujú na jednej frekvencii, sú prijímače GLONASS navrhnuté na spracovanie viacerých frekvencií, čo umožňuje efektívne rozlišovanie medzi satelitmi. Táto komplexnosť prispieva k vyššej presnosti pri určovaní polohy [21].

2.4. BeiDou

Systém BeiDou (BDS) bol vyvinutý Čínou ako reakcia na americký systém GPS, pričom jeho história sa začala v polovici 90. rokov

20. storočia. Práce na systéme sa začali v roku 1994 a prvá družica BeiDou-1A bola vypustená v decembri 2000, pričom poskytovala služby iba v rámci Číny [24][25].

Segmenty navigačného systému BeiDou

Vesmírny segment - Družice: BeiDou systém používa kombináciu družíc na strednom zemskom orbite, geosynchronnej orbite a geostacionárnej orbite. Celkovo systém pozostáva z 35 družíc, z čoho 27 je na MEO, 5 na GEO a 3 na IGSO [28].

Riadiaci segment - Master Control Station: Zodpovedná za riadenie konštelácie družíc a spracovanie meraní od Monitor Stations, aby sa vygenerovala navigačná správa [28].

Používateľský segment - Toto zahŕňa rôzne typy prijímačov a zariadení, ktoré môžu prijímať a spracovávať signály od družíc BeiDou. Užívateľské zariadenia môžu byť použité v rôznych aplikáciách, ako sú mobilné telefóny, automobilové navigácie, letecká navigácia a mnoho ďalších [28].

2.5. Rozširujúce systémy globálneho navigačného satelitného systému

Okrem základných globálnych navigačných systémov existujú aj rozširujúce navigačné satelitné systémy, ktoré zlepšujú presnosť a spoľahlivosť týchto základných systémov. Tieto systémy poskytujú korekčné signály a sú mimoriadne užitočné v aplikáciách, ktoré si vyžadujú vysokú presnosť, ako sú letectvo, geodézia, poľnohospodárstvo a ďalšie iné [29].

2.5.1. Systém s palubným rozšírením – ABAS

ABAS, čo je skratka pre Augmented Board-based Navigation System, predstavuje pokročilý navigačný systém, ktorý sa najčastejšie využíva v letectve. Tento systém rozširuje funkcie globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS) prostredníctvom integrácie dodatočných palubných monitorovacích obvodov a využívania ďalších navigačných senzorov na palube. Takáto integrácia prispieva k zlepšeniu navigačného výkonu, najmä v oblasti monitorovania integrity [30].

2.5.2. Systém s družicovým rozšírením – SBAS

Satelitný systém (SBAS) je technologický systém, ktorý zlepšuje presnosť a spoľahlivosť globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS). SBAS poskytuje dodatočné korekčné údaje, ktoré prispievajú k presnejšiemu určeniu polohy a zvyšujú integritu navigačných signálov [33].

2.5.3. Systém s pozemným rozšírením – GBAS

Systém pozemného rozšírenia (GBAS, Ground Based Augmentation System), je technológia, ktorá poskytuje diferenciálne korekcie a monitorovanie integrity signálov globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS). Jeho hlavnou úlohou je podporovať presné prístupové operácie v civilnom letectve, pričom zvyšuje presnosť a spoľahlivosť navigačných informácií pre lietadlá v okolí letiska [34][35].

3. Súčasný stav riešenej problematiky

Táto časť je zameraná na popis súčasného stavu satelitnej navigácie pri bezpilotných prostriedkoch.

3.1. Družicová navigácia pri bezpilotných prostriedkoch

Bezpilotné prostriedky a drony sú vybavené družicovou navigáciou, známe aj ako GPS drony. Využívajú globálny polohový systém (GPS) na určenie svojej polohy a navigáciu. Táto technológia umožňuje dronom okrem iného automaticky sa vracieť na miesto vzletu, stabilizovať let, sledovať ciele a mnoho ďalších funkcií.

Kvalita signálu GNSS pri UAV

Presnosť: Presnosť sa definuje ako miera zhody medzi predpokladanou alebo zmeranou polohou, časom alebo rýchlosťou prijímača GNSS a jeho skutočnými hodnotami. Chyba polohy GNSS predstavuje rozdiel medzi vypočítanou a aktuálnou polohou. Pre akúkoľvek vypočítanú polohu na konkrétnom mieste by mala byť pravdepodobnosť, že chyba polohy sa nachádza v rámci stanovených požiadaviek na presnosť, minimálne 95 %. Chyby polohy sú spôsobené obehmi družíc a chybovými charakteristikami GNSS, ktoré sa môžu v priebehu času meniť [33][34].

Integrita: Miera dôvery v informácie poskytované celým systémom je kľúčová pre ich považovanie za správne. Integrita systému zahŕňa jeho schopnosť poskytovať užívateľom včasné a presné varovania (výstrahy) v situáciách, keď by systém nemal byť použitý na konkrétnu činnosť alebo fázu letu. GNSS prijímač využíva RAIM (alebo AAIM) na overenie integrity prijatých signálov a na zistenie, či niektorý zo satelitov neposkytuje nepresné údaje. RAIM generuje varovanie, ktoré naznačuje možnosť výskytu neprijateľnej chyby. Pred každým letom na určené letisko je potrebné funkciu RAIM overiť. V prípade predpokladanej nedostupnosti RAIM, ak sa odhaduje, že signál nebude dostupný dlhšie ako 15 minút, budú vydané informácie prostredníctvom NOTAM [33][34].

Kontinuita: Schopnosť systému vykonávať svoju funkciu bez neplánovaných výpadkov počas predpokladanej prevádzky. Pravdepodobnosť straty dostupnosti signálu GPS v rámci nominálnej 24-slotovej konštelácie v dôsledku neplánovaného prerušenia nesmie presiahnuť 2×10^{-4} za hodinu [33][34].

Dostupnosť: Dostupnosť GNSS predstavuje percento času, počas ktorého je systém využívaný na navigáciu a poskytuje posádke, autopilotovi alebo iným riadiacim systémom spoľahlivé navigačné údaje [33][34].

3.2. Rušenie GNSS signálu pri bezpilotných prostriedkoch

Rušenie signálu GNSS aj pri dronoch predstavuje problém, ktorý môže mať dopad na presnosť a dostupnosť globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS), ako sú GPS, GLONASS a Galileo. Toto rušenie sa delí do dvoch hlavných skupín: neúmyselné a zámerne rušenie.

3.2.1. Neúmyselné rušenie GNSS signálu

Vzniká v dôsledku neúmyselného prenosu signálu v rámci frekvencií GNSS alebo v ich blízkosti, pričom zdrojom sú

vonkajšie faktory. Môže ísť o rôzne emisie z rôznych vysielačov, ako sú televízne vysielanie, radar a iné.

Odraz GNSS signálu od budov

Rušenie signálu GNSS odrazom od budov nie je priamo spôsobom rušenia, avšak môže prispieť k problému s presnosťou určenia polohy. Odraz signálu GNSS od budov je jedným z kľúčových faktorov, ktoré ovplyvňujú presnosť navigácie v mestských oblastiach. Tento jav sa označuje ako multipath alebo viacestné šírenie signálu. Keď signál GNSS (napríklad GPS alebo GLONASS) dorazí k prijímaču, môže byť odrazený od rôznych objektov v okolí, ako sú fasády budov alebo kovové strechy. Tieto odrazené signály môžu následne viesť k chybám v určení polohy a času letu od pôvodného signálu [35][36].

Riešenie odrazov GNSS signálov od budov:

- Špeciálne antény: Nasadenie antén s pravotočivou kruhovou polarizáciou môže pomôcť znížiť vplyv odrazených signálov
- Kvalitné vybavenie: Používanie vyššej kvality prijímačov a antén môže prispieť k zmierneniu účinkov multipath efektu.
- Technologické postupy: Zavedenie pokročilých technológií, ako sú inerciálne meracie jednotky (IMU), môže taktiež zlepšiť stabilitu merania aj v prostrediach s rušením [35][36].

Rušenie GNSS signálov geomagnetickými búrkami

Rušenie GNSS signálu môže byť spôsobené geomagnetickými búrkami, ktoré sú spôsobené interakciou slnečného vetra s magnetosférou Zeme. Tieto búrky môžu ovplyvniť presnosť GPS signálu, pretože zvyšujú hustotu elektrónov v ionosfére, čo spomaľuje signály zo satelitov a znižuje presnosť polohy [35][36].

Silná geomagnetická búrka môže ovplyvniť GNSS signál v niekoľkých spôsoboch:

- Presnosť signálu: Zvýšenie hustoty elektrónov v ionosfére počas geomagnetických búrok môže ohýbať signály zo satelitov, čo spomaľuje ich dosiahnutie GPS zariadení a znižuje presnosť polohy.
- Rušenie komunikácií: Búrky môžu narušiť rádiovú komunikáciu, čo môže ovplyvniť funkčnosť satelitných systémov, vrátane GPS.
- Výpadky signálu: Menšie výpadky satelitných sietí, vrátane GPS, môžu nastávať pri slabších búrkach.
- Polárne žiary: Hoci polárne žiary sú vizuálnym javom, súvisiacim s geomagnetickými búrkami, môžu byť indikáciou aktivity, ktorá môže ovplyvniť satelitné systémy [35][36].

Silnejšie geomagnetické búrky môžu mať vážnejšie dôsledky, ako napríklad zlyhanie satelitov alebo rozsiahle výpadky elektrickej energie [35][36].

Geomagnetické búrky môžu mať najčastejšie nasledujúce následky pre satelitné systémy:

- Poškodenie satelitov: Geomagnetické búrky môžu zvýšiť počet nabitých častíc v blízkosti satelitov, čo môže interferovať s elektronikou a viesť k ich zlyhaniu. Silné búrky môžu dokonca spôsobiť stratu satelitov v dôsledku zvýšeného trenia v horných vrstvách atmosféry.
- Narušenie komunikácií: Búrky môžu narušiť komunikáciu so satelitmi, čo môže ovplyvniť funkčnosť systémov ako je GPS, ktoré závisia na presných signáloch od satelitov.
- Zvýšené žiarenie: Satelity sa stávajú menej spoľahlivými kvôli zvýšenému žiareniu, čo môže narušiť ich citlivé komponenty.
- Chyby v lokalizácii: Geomagnetické búrky môžu spôsobiť chyby v lokalizácii a navigácii, pretože zmenia dráhu signálu zo satelitov [35][36].

Rušenie GNSS signálu prostredníctvom elektromagnetických vln

Tento typ rušenia môže byť neúmyselný, ale aj zámerný.

Neúmyselné rušenie: Toto rušenie môže vzniknúť z rôznych elektrických zariadení, ktoré operujú na frekvenciách blízkych GNSS systémom, ako sú rádiové spoje, televízne vysielacie alebo poškodené bazové stanice mobilných operátorov [74].

Úmyselné rušenie: Toto rušenie sa realizuje prostredníctvom rušičiek, ktoré emitujú elektromagnetické vlny na frekvenciách využívaných GNSS systémami, ako je napríklad 1575,42 MHz pre pásmo L1 GPS. Tieto rušičky môžu prehlušiť legitímne signály, čím znemožňujú GPS prijímačom určiť presnú polohu. Úmyselné rušenie sa využíva v bezpečnostných aplikáciách, ako je ochrana pred sledovaním alebo narušenie nepriateľských systémov [74].

Princíp rušenia: Rušičky GNSS fungujú tak, že vysielajú silné elektromagnetické signály na rovnakej frekvencii ako GNSS systémy. Tieto signály prekonávajú slabšie signály zo satelitov, čo bráni GPS prijímačom v získavaní presných údajov o polohe. Rušičky môžu využívať nepretržité rušenie (CW) alebo pulzné rušenie, ktoré môže byť ťažšie detekovateľné [74].

3.2.2. Zámerné rušenie GNSS signálu

Zámerné rušenie je rušenie, ktoré môže byť spôsobené vojenskými konfliktmi, teroristickými činmi alebo nelegálnymi aktivitami organizovaných skupín, alebo jednotlivcov, ktorí sa snažia obísť sledovacie systémy založené na určovaní polohy pomocou GNSS. Tento typ rušenia má za cieľ zabrániť prijímaču v prijímaní správnych informácií. Existujú tri hlavné formy zámerného rušenia: Jamming, Spoofing a Meaconing [37].

Zámerné rušenie: Jamming

Je to najjednoduchšia forma rušenia, pri ktorej GNSS prijímač nie je schopný zachytiť slabšie signály zo satelitov, pretože silnejšie signály vysielané z iného zariadenia na rovnakej frekvencii prekryjú požadovaný signál z družice. Dôsledkom toho je nedostupnosť systému. Hoci tento typ rušenia zaraďujeme medzi zámerné, v niektorých prípadoch môže byť spôsobený aj nesprávne fungujúcim zariadením [37] [40].

V mnohých situáciách je "jamming" spôsobený úmyselne, avšak bez zámeru spôsobiť škodu. Sem patrí aj používanie zariadení na rušenie elektronických rádiových alebo telekomunikačných zariadení, známych ako "rušičky" alebo PPD (Personal Privacy Devices) [37][40].

Na prvý pohľad sa môže zdať, že signály vysielané na frekvencii GNSS, alebo v jej blízkosti majú za cieľ poškodiť užívateľov GNSS, avšak v prevažnej väčšine prípadov je motiváciou zabrániť sledovaniu používateľa rušičky [37][40].

Zámerné rušenie: Meaconing

Druhým spôsobom úmyselného rušenia je vysielanie signálu na rovnakej frekvencii s oneskorením, čo spôsobuje zmätok v navigačnom systéme a vedie k nepresnému určeniu polohy. Tento typ rušenia je zložitejší ako „jamming“, pretože si vyžaduje znalosť polohy rušeného prijímača [41].

Ako funguje „meaconing“ ?

- Zachytenie signálu: Útočník využíva anténu a prijímač na zachytenie legitímneho GNSS signálu zo satelitov.
- Úprava alebo oneskorenie: Signál môže byť jednoducho "replaynutý" s minimálnym oneskorením, alebo môže byť upravený (napríklad zosilnený alebo mierne posunutý v čase).
- Opätovné vysielanie: Upravený signál sa následne vysieľa späť do okolia s vyššou intenzitou než originálny satelitný signál, ktorý je slabší, keďže prichádza z obežnej dráhy.
- Prijímač je oklamán: Dron, lietadlo alebo iné zariadenie prijíma tento falošný, no na prvý pohľad „legitímny“ signál a vypočíta nesprávnu polohu [41].

Zámerné rušenie: Spoofing

Pri tomto type rušenia sú cielene vytvárané signály, ktoré sú neodlíšiteľné od pôvodných signálov zo satelitov. Prijímač spracováva tieto falošné signály rovnako ako skutočné, čo vedie k poskytnutiu nepravdivých informácií pre GNSS prijímač, a tým pádom k nesprávnej určenej polohe. Inteligentné „spoofery“ dokážu sledovať polohu cieľového prijímača a využiť tieto informácie na generovanie dostatočne silných GNSS signálov, ktoré sa pôvodne zhodovali so skutočnými (slabšími) signálmi v danom čase [42].

Tým získavajú úplnú kontrolu nad zariadením. S pomocou takýchto systémov je možné prevziať kontrolu nad autonómnymi bezpilotnými systémami a donútiť ich pristáť na vopred určenom mieste [42].

„Spoofing“ predstavuje väčšie nebezpečenstvo než rušenie typu „jamming“, pretože prijímač nie je schopný identifikovať takýto útok, a preto nemôže upozorniť používateľa na to, že jeho výpočty a poskytované navigačné údaje sú nesprávne. Tento typ útoku môže byť realizovaný z akéhokoľvek miesta, aj niekoľko kilometrov vzdialeného, pričom jediným obmedzením je zakrivenie Zeme. V letectve, ak dôjde k rušeniu, je možné porovnávať výsledky GNSS prijímača s inými systémami na palube lietadla. Zabezpečiť GNSS prijímač lietadla bez povšimnutia posádky je v súčasnosti takmer nemožné [42].

Pri „spoofingu“ a „meaconingu“ hrozí riziko ohrozenia bezpečnosti len v prípade, že piloti nevenujú dostatočnú pozornosť. V iných situáciách akéhokoľvek rušenie znamená, že GNSS aplikácie nie sú použiteľné, čo môže mať značné ekonomické a ekologické dôsledky. Napríklad, ak sa GNSS využíva na priblíženie k pristátiu a na letisku príchodu nie je k dispozícii konvenčná alternatíva, môže to viesť k nutnosti presmerovania na náhradné letisko [42][43].

Nezamýšľané rušenie GNSS signálu

Vojnové konflikty: Vojna môže ovplyvniť signál GNSS viacerými spôsobmi, najmä v súvislosti s rušením a podvrhnutím signálu. Tieto aktivity sa stávajú častejším problémom, najmä v oblastiach postihnutých konfliktmi [44].

4. Metodika a metódy skúmania

V úvodnej časti sa popisujú základné princípy fungovania GNSS a ich využitie v rôznych oblastiach. Ďalej je analyzované súčasné využívanie GNSS v bezpilotných prostriedkoch, so zameraním na presnosť, spoľahlivosť a obmedzenia.

Hlavným cieľom práce je skúmať vplyv zastavaného prostredia na presnosť a spoľahlivosť satelitnej navigácie UAV, najmä v podmienkach s výškovými prekážkami a zdrojmi rušenia. Zároveň sa hodnotí miera degradácie signálu a riziká spojené s prevádzkou dronov v mestských oblastiach, pričom sú navrhnuté možné riešenia na minimalizáciu týchto vplyvov.

Praktická časť výskumu zahŕňala:

- Výber testovacích lokalít (Žilinská univerzita a letisko Dolný Hričov)
- Prípravu UAV (DJI Mavic 2 Pro a DJI Mini 4 Pro)
- Realizáciu stacionárnych letov na meranie vplyvu prostredia na GNSS signál
- Zber, archiváciu a spracovanie údajov o sile signálu, počte satelitov a presnosti polohy

Získané dáta boli analyzované pomocou vizualizácie rušenia, porovnania lokalít a kvalitatívneho zhodnotenia problémových oblastí. Výsledky slúžia ako základ pre návrh opatrení na zlepšenie navigácie UAV v zastavaných oblastiach.

5. Praktický výskum a výsledky

Praktický výskum vplyvu rušenia GNSS signálu v zastavaných oblastiach sme realizovali pomocou dvoch dronov s rozdielnou

navigačnou výbavou: DJI Mini 4 Pro a DJI Mavic 2 Pro. Tieto drony nám umožnili porovnať správanie pri rôznych úrovniach satelitnej dostupnosti a rušenia v zastavaných oblastiach, kde často dochádza k odrazom signálu, zníženej viditeľnosti družíc alebo ich krátkodobému výpadku.

Dron: DJI Mini 4 Pro

DJI Mini 4 Pro je výkonný, ľahký dron s hmotnosťou len 249 g, ktorý v mnohých krajinách nevyžaduje registráciu ani pilotné školenie. Vyznačuje sa kompaktnými rozmermi, 48 Mpx kamerou so 4K HDR videom a trojosovým gimbalom pre plynulé zábery. Disponuje výdržou batérie do 34 minút, maximálnou rýchlosťou 57,6 km/h a dosahom ovládania až 10 km. Bezpečnosť zvyšuje všesmerové snímanie prekážok a systém APAS na ich aktívne obchádzanie. Prenos obrazu zabezpečuje moderný systém OcuSync 4. Dron podporuje viaceré inteligentné letové režimy vrátane ActiveTrack 360° a waypointov, a ovláda sa cez DJI RC-N2 alebo RC 2. Pre navigáciu využíva systémy GPS, Galileo a BeiDou, čo mu umožňuje stabilný let aj v náročných podmienkach, pričom dokáže zachytiť signály z viac ako 20–30 družíc súčasne [71].

Dron: DJI Mavic 2 Pro

DJI Mavic 2 Pro je profesionálny dron vybavený 1-palcovým 20 Mpx CMOS senzorom od Hasselblad, nastaviteľnou clonou f/2.8–f/11 a schopnosťou nahrávať 4K video pri 100 Mbps. Kamera je stabilizovaná trojosovým gimbalom pre plynulé zábery. Dron dosahuje rýchlosť až 72 km/h, letí do 31 minút na jedno nabitie a zvládne výšku až 6000 metrov. Disponuje všesmerovým snímaním prekážok pre zvýšenú bezpečnosť. Aj napriek robustnej výbave je kompaktný a váži 907 g. Pre navigáciu využíva systémy GPS a GLONASS, ktoré mu umožňujú prijímať signály z 15–25 satelitov súčasne, čím zabezpečuje stabilný let a presné určenie polohy aj v náročných podmienkach [72].

5.1. Analýza rušenia GNSS signálu v zastavaných prostrediach

Cieľom praktického výskumu bolo analyzovať správanie GNSS signálu v zastavaných oblastiach pri použití bezpilotných lietajúcich prostriedkov. Hlavnou úlohou bolo zistiť, do akej miery je satelitná navigácia narušená v prostredí s stavebnými prekážkami a aké sú prejavy tohto rušenia pri statickej prevádzke UAV.

5.1.1. Skúšobné meranie v areáli letiska Žilina

Prvé testovacie meranie sa uskutočnilo v areáli letiska Žilina, v blízkosti rozsiahlej plechovej konštrukcie – železného hangára s výškou približne 6 metrov a dĺžkou viac ako 20 metrov. Drony boli počas merania umiestnené staticky na zemi a fyzicky sa nepohybovali. Napriek tomu bol na displeji ovládacieho zariadenia pozorovaný zdanlivý pohyb UAV, čo naznačuje výskyt rušenia a odrazov satelitného signálu spôsobených blízkosťou hangára.

Priebeh merania s UAV DJI Mavic 2 Pro – letisko Žilina

Testovanie s bezpilotným prostriedkom DJI Mavic 2 Pro prebiehalo v statickej konfigurácii po dobu 2 126 sekúnd. Počas tejto doby boli zaznamenávané polohové údaje s frekvenciou každé 4 milisekundy. Vizualizácia údajov na ovládacom zariadení odhalila zdanlivý pohyb UAV, hoci fyzicky zostával na jednom mieste. Tento jav potvrdil existenciu nepresností v určovaní polohy, spôsobených odrazmi a rušením GNSS signálu v danej lokalite. Detailné vyhodnotenie záznamu ukázalo, že dron vykazoval zmeny v polohe, aj keď sa počas merania nepohol.

Priebeh merania s UAV DJI Mini 4 Pro – letisko Žilina

Vzhľadom na to, že prvý použitý dron nepodporoval všetky dostupné GNSS systémy, prešlo sa k meraniu s UAV schopným využívať širšie spektrum navigačných systémov. Meranie prebiehalo na rovnakom mieste a za rovnakých podmienok ako predchádzajúci test. Postup bol identický.

Počas merania trvajúceho 2 087 sekúnd sa polohové údaje zaznamenávali každé 4 milisekundy. Vizualizácia dát odhalila, že napriek využitiu širšieho spektra GNSS systémov bolo zaznamenané výrazné rušenie signálu. Tento jav potvrdil, že prítomnosť budov v blízkosti UAV má negatívny vplyv na kvalitu satelitného príjmu, čo predstavuje významné obmedzenie pri prevádzke v zastavaných oblastiach.

Detailný pohľad na trajektóriu ukázal falošné zobrazenie pohybu UAV, hoci dron sa nachádzal približne 10 metrov od kovového hangára a počas celého merania zotrval v statickej polohe. Tento výsledok ďalej potvrdzuje citlivosť GNSS prijímačov na viacnásobné odrazy signálov v prostredí so zvýšeným množstvom prekážok.

5.1.2. Meranie v areáli Žilinskej Univerzity

Aby sme jednoznačne potvrdili prítomnosť rušenia GNSS signálu a overili jeho intenzitu, vykonali sme merania v areáli Žilinskej univerzity. Vybrané miesto je obklopené budovami z troch strán, čo vytvára ideálne podmienky na testovanie účinkov zníženej dostupnosti satelitného signálu v mestskom prostredí.

Na testovanie vplyvu zastavaného prostredia na presnosť GNSS signálu boli použité rovnaké typy bezpilotných prostriedkov ako v areáli letiska Žilina. Drony boli nastavené s identickými prevádzkovými parametrami a umiestnené približne do stredu parkoviska v areáli Žilinskej univerzity. Počas celého merania zostali v statickej polohe. Cieľom bolo overiť, či aj v tejto lokalite dôjde k zobrazeniu chybných trajektórií letu, aj keď sa bezpilotné prostriedky fyzicky nepohybovali. Testovaná lokalita bola ohraničená budovami z troch strán, pričom ich odhadovaná výška sa pohybovala medzi 13 a 15 metrami, čo vytváralo podmienky pre možný výskyt väčšieho rušenia GNSS signálu.

Priebeh merania s UAV DJI Mavic 2 Pro – Žilinská Univerzita

V rámci ďalšieho merania bol dron opäť nastavený do letovej konfigurácie s identickými parametrami ako pri predchádzajúcich pokusoch. UAV bol umiestnený do stredu parkoviska, kde zotrval v statickej polohe po dobu 4 470 sekúnd. Polohové údaje sa zaznamenávali každé 4 milisekundy s cieľom

detailne analyzovať prípadné odchýlky spôsobené rušením GNSS signálu.

Analýza zaznamenaných dát ukázala výrazné rušenie GNSS signálu, ktoré bolo ešte intenzívnejšie než počas predchádzajúcich meraní na letisku. Napriek tomu, že dron zostával v jednej statickej polohe, zaznamenaná trajektória vykazovala výrazné odchýlky, čo potvrdzuje značné narušenie presnosti satelitnej navigácie v zastavanom mestskom prostredí.

Priebeh merania s UAV DJI Mini 4 Pro – Žilinská Univerzita

Na posledné meranie bol použitý dron DJI Mini 4 Pro, ktorý je vybavený širším spektrom GNSS prijímačov. Cieľom testu bolo zistiť, či širšia GNSS podpora dokáže zmierniť vplyv rušenia v mestskom prostredí. Konfigurácia zariadenia a miesto merania zostali rovnaké ako pri predchádzajúcich pokusoch. UAV zotrval v statickej polohe 3 316 sekúnd so záznamom polohy každé 4 milisekundy.

Analýza dát ukázala, že napriek širšiemu spektru GNSS prijímačov bolo rušenie signálu výrazné. Zaujímavým javom bolo, že hneď na začiatku merania systém predpokladal polohu dronu na streche budovy, aj keď sa fyzicky nachádzal v strede parkoviska.

Aby sme dosiahli úplné a presné výsledky, zohľadnili sme aj možný vplyv geomagnetických búrok. Skontrolovali sme, či počas merania neboli príliš intenzívne, pretože by to mohlo výrazne ovplyvniť naše výsledky.

Na základe analýzy dát z aplikácie Air Data a zobrazeného Keplerovho indexu na obrázku môžeme potvrdiť, že v čase merania bol tento index nízky. To naznačuje, že geomagnetické búrky nemali vplyv na GNSS signály. Môžeme teda s istotou povedať, že s rastúcim počtom budov a zastavaných oblastí sa zvyšuje aj rušenie GNSS signálov. Taktiež sme vylúčili možnosť, že by kvalitnejší dron s lepšími GNSS prijímačmi mohol významne znížiť rušenie. Použili sme dva drony – jeden s horšími prijímačmi a druhý s lepšími a výsledky sa ukázali ako prakticky rovnaké.

5.2. Výsledky a možnosť riešení

Pri prevádzke bezpilotných prostriedkov v mestských oblastiach často dochádza k výraznému narušeniu signálu GNSS, najmä v dôsledku odrazov od budov, čo je známe ako „multipath efekt“. Tento jav bol opakovane zaznamenaný počas praktických meraní s rôznymi typmi dronov.

Na základe analýzy zozbieraných dát sme zistili, že ide o vážny problém, ktorý by mohol v budúcnosti negatívne ovplyvniť bezpečnú a spoľahlivú integráciu dronov do bežnej prevádzky, najmä v hustých mestských oblastiach s vysokými budovami.

V nasledujúcej časti práce sú preto predstavené vybrané riešenia, ktoré by mohli pomôcť zmierniť alebo úplne odstrániť tento problém:

Využitie viacerých GNSS systémov súčasne

Moderné GNSS prijímače, ktoré dokážu spracovávať signály z viacerých globálnych navigačných systémov, ako sú GPS,

Galileo, GLONASS a BeiDou, teoreticky zvyšujú spoľahlivosť určenia polohy. Využívajú totiž väčší počet dostupných satelitov z rôznych konštelácií, čo môže byť obzvlášť výhodné v mestských oblastiach.

V rámci praktického testovania bol nasadený dron vybavený prijímačom, ktorý podporuje viacero GNSS systémov. Avšak výsledky nepreukázali výrazné zlepšenie presnosti alebo stability signálu v porovnaní s bežnými prijímačmi. Napriek tomu nemožno túto možnosť úplne vylúčiť; predpokladá sa, že dron, ktorý by efektívne integroval všetky dostupné globálne navigačné systémy, by mohol v budúcnosti prispieť k zlepšeniu tejto situácie.

Monitorovanie dostupnosti satelitov a geomagnetických podmienok pred letom

Jedným z efektívnych preventívnych opatrení na zníženie rizika výpadkov alebo rušenia GNSS signálu je sledovanie dostupnosti satelitov a aktuálnych geomagnetických podmienok pred samotným letom. Existuje množstvo aplikácií a nástrojov, ktoré umožňujú vizualizáciu počtu viditeľných satelitov pre konkrétnu lokalitu a čas. Medzi najznámejšie patrí GNSS View, GNSSToolbox a Trimble GNSS Planning Online. Na základe údajov z týchto nástrojov je možné napláňovať let tak, aby sa uskutočnil len vtedy, keď je zabezpečený dostatočný počet satelitov z rôznych GNSS konštelácií. Týmto spôsobom sa zvyšuje pravdepodobnosť kvalitného príjmu signálu a súčasne sa minimalizuje riziko rušenia alebo straty pozície počas letu.

Ďalším významným faktorom, ktorý môže ovplyvniť presnosť GNSS, je geomagnetická aktivita. Zvýšená solárna alebo geomagnetická aktivita môže viesť k výpadkom a chybám v lokalizácii. Preto je pred letom vhodné sledovať aktuálne predpovede geomagnetických podmienok. V rámci nášho praktického výskumu sme tieto údaje priebežne monitorovali a zaznamenali ich potenciálny vplyv na kvalitu signálu počas testovacích letov.

Použitie GNSS antén s potlačením multipath efektu

Multipath efekt je jav, pri ktorom signál z GNSS satelitu nedosahuje prijímač priamo, ale je odrazený od okolitých objektov, ako sú budovy. Tento odrazený signál môže spôsobiť chyby v meraní polohy, pretože dochádza k oneskoreniam a fázovým posunom.

Na riešenie tohto problému sa používajú špecializované GNSS antény, ktoré sú navrhnuté tak, aby potláčali signály prichádzajúce z nízkych uhlov, teda tie, ktoré sú často odrazené od blízkych objektov. Tieto antény zvyčajne využívajú technológie, ako sú širokopásmové filtre, ktoré selektívne potláčajú signály prichádzajúce z nevhodných smerov, čím sa minimalizuje vplyv odrazov na merania polohy.

Existuje niekoľko typov antén, vrátane antén s uhlovým filtrovaním, ktoré sa zameriavajú na prísne filtrovanie signálov z horizontálneho uhla. Tieto antény zlepšujú kvalitu príjmu a minimalizujú chyby spôsobené multipath efektom. Sú obzvlášť užitočné v mestských oblastiach, kde sú odrazy signálov bežné a môžu negatívne ovplyvniť presnosť navigácie bezpilotných prostriedkov.

Použitie týchto antén vedie k výraznému zlepšeniu presnosti určovania polohy, čím sa znižuje riziko navigačných chýb a zvyšuje sa celková spoľahlivosť systému GNSS. To je kľúčové pre bezpečnú prevádzku dronov v náročných podmienkach.

Využitie vizuálnej odometrie a lidarovej navigácie ako alternatíva ku GNSS

V prostrediach s obmedzenou dostupnosťou, alebo spoľahlivosťou GNSS signálu je možné zvýšiť autonómiu a presnosť lokalizácie dronu pridaním senzorov, ktoré umožňujú vizuálnu odometriu alebo lidarovú navigáciu. Tieto technológie fungujú nezávisle od satelitného signálu a predstavujú efektívnu alternatívu v takzvaných „náročných GNSS prostrediach“.

Vizuálna odometria využíva kamery, buď mono, alebo stereo, ktoré neustále snímajú okolie dronu. Algoritmus analyzuje po sebe nasledujúce snímky, vyhodnocuje zmeny v perspektíve a vypočítava pohyb zariadenia voči okolitému prostrediu. Tento princíp umožňuje nepretržité určovanie pozície a orientácie dronu bez potreby externej navigačnej infraštruktúry.

Podobne lidarová navigácia, ktorá využíva laserový senzor na mapovanie okolia v reálnom čase, poskytuje spoľahlivé riešenie v oblastiach, kde je GNSS signál nedostatočný, alebo nedostupný, ako sú úzke ulice, priestory pod mostami či interiéry budov.

Navigácia podporená umelou inteligenciou

Algoritmy umelej inteligencie (AI) majú schopnosť predpovedať a opravovať chyby v určení polohy na základe analýzy historických letových dát, správania signálu v konkrétnych podmienkach a kombinácie údajov z rôznych senzorov. Tieto systémy sú navrhnuté tak, aby sa neustále učili a zlepšovali svoju schopnosť identifikovať situácie, v ktorých dochádza k rušeniu signálov. Následne dokážu v reálnom čase upravovať spracovanie údajov. Cieľom je minimalizovať chyby pri určovaní polohy a zabezpečiť vyššiu presnosť a stabilitu navigácie, aj v náročných podmienkach.

Spolupráca s pozemnou infraštruktúrou

V mestách sa čoraz častejšie uplatňuje technológia, ktorá umožňuje dronom komunikovať s inteligentnými zariadeniami na zemi, ako sú senzory umiestnené na budovách alebo špeciálne stanice poskytujúce presnejšie informácie o ich polohe. Tieto systémy zlepšujú orientáciu dronov a zvyšujú ich presnosť. Okrem toho môžu byť riadené centrálnou pomocou umelej inteligencie (AI), ktorá spracováva a analyzuje tieto dáta v reálnom čase.

6. Záver

V teoretickej časti bol podrobne opísaný princíp fungovania globálnych navigačných systémov (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), ich vývoj, rozdiely a faktory ovplyvňujúce kvalitu signálu, ako sú atmosférické podmienky či multipath efekt. Nasledovala časť zameraná na špecifiká využívania GNSS technológií v dronoch, vrátane ich výhod i limitácií v zložitom mestskom prostredí. Praktická časť práce sa zamerala na experimentálne merania v areáli letiska Žilina a v areáli

Žilinskej univerzity, ktoré potvrdili výrazné rušenie signálu v prítomnosti budov. Výsledky ukázali, že v mestských oblastiach môže dochádzať k výrazným odchýlkam v určovaní polohy, čo predstavuje riziko pre bezpečnú prevádzku dronov. V závere boli navrhnuté riešenia na zmiernenie týchto problémov, vrátane využitia viacerých GNSS systémov, monitorovania podmienok pred letom, použitia moderných antén a zapojenia umelej inteligencie. Práca podčiarkuje potrebu ďalšieho výskumu pre zvýšenie spoľahlivosti a bezpečnosti bezpilotných systémov v urbanizovanom prostredí.

PodĎakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra 2014 - 2020 pre projekt: Inteligentné operačné a spracovateľské systémy pre UAV, s ITMS kódom projektu 313011V422, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Referencie

- [1] Support. Polar (2025) Online. Dostupné na: <https://support.polar.com/en/what-is-gnss> [citované 2024-11-03].
- [2] ABS. (2023) Online. Dostupné na: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/inzinierske-stavby/vyuzitie-gnss-technologie-pri-dopravných-stavbách> [citované 2025-01-03].
- [3] Elpool. (bez dát) Online. Dostupné na: <https://www.elpool.sk/vyuzitie-gps-glonass-pri-zabezpečovacích-systémoch/> [citované 2024-11-11].
- [4] Techbox. (2016) Online. Dostupné na: <https://www.techbox.sk/co-je-gps-globalny-pozicny-system> [citované 2024-12-05].
- [5] Vladimír Sedlák (2020) GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SATELITNÉ SYSTÉMY. Online. Dostupné na: <https://unibook.upjs.sk/img/cms/2020/pf/globalne-navigacne-systemy.pdf> [citované 202-12-25].
- [6] EUSPA (bez dát). Edas-maritime. Online. Dostupné na: <https://edas-maritime.gsc-europa.eu/european-gnss/what-gnss> [citované 2025-01-07].
- [7] UPJŠ (bez dát). Online. Dostupné na: https://ugeshare.science.upjs.sk/webshared/uge_web_fil/es/studium/ucebnice_skripta/2019_051_PF_GlobalneNa_vigacne_VNUTRO.pdf [citované 2025-01-08].
- [8] Európska komisia (2021). Desiat rokov od spustenia projektu Galileo. Online. Dostupné na: https://slovakia.representation.ec.europa.eu/news/desat-rokov-od-spustenia-projektu-galileo-2021-11-09_sk [citované 2025-01-10].
- [9] ČTK, SITA (2016). Pravda. Online. Dostupné na: <https://ekonomika.pravda.sk/ludia/clanok/413938-europsky-navigacny-system-galileo-je-pripraveny-na-start/> [citované 2025-01-12].
- [10] TASR (2019). Pravda. Online. Dostupné na: <https://ekonomika.pravda.sk/ludia/clanok/525282-navigacny-system-galileo-vyuziva-uz-miliarda-pouzivatelov-smartfonov/> [citované 2025-01-12].
- [11] Publi (bez dát). Online. Dostupné na: <https://publi.cz/books/231/05.html> [citované 2025-01-13].
- [12] Techbox (2017). Čo je to GLONASS? Ruská odpoveď na GPS. Online. Dostupné na: <https://www.techbox.sk/214594> [citované 2025-01-15].
- [13] Elpool (bez dát). Využitie gps glonass pri zabezpečovacích systémoch. Online. Dostupné na: <https://www.elpool.sk/vyuzitie-gps-glonass-pri-zabezpečovacích-systémoch/> [citované 2025-01-15].
- [14] Fodor (bez dát). Online. Dostupné na: http://www.fodor.sk/spectrum/druzicove_rns.htm [citované 2025-01-16].
- [15] UPJŠ (bez dát). Online. Dostupné na: https://ugeshare.science.upjs.sk/webshared/Vyucba/GNSS/GNSS_2023/GNSS_5.pdf [citované 2025-01-18].
- [16] Peter Spolník (2024). Riziko používania čínskeho satelitného navigačného systému BeiDou. Online. Dostupné na: https://www.epochtimes.sk/riziko-pouzivania-cinskeho-satelitneho-navigacneho-systemu-beidou-ako-zistit-ci-vas-telefon-prijima-jeho-signaly_12328.html [citované 2025-01-19].
- [17] Pravda (2023) Online. Dostupné na: <https://stan021.blog.pravda.sk/2023/05/18/navigacne-satelity-beidou-po-3-rokoch-vitaju-noveho-silnejšieho-clena/> [citované 2025-01-20].
- [18] Michaela Mikulášiková (bez dát). NAVIGAČNÉ SYSTÉMY. Online. Dostupné na: <https://drepo.uniza.sk/server/api/core/bitstreams/30d1bbd9-61df-44c7-b8a6-e2bf5688cb55/content> [citované 2025-01-22].
- [19] Technická univerzita v Košiciach (bez dát). Regionálne centrum leteckej dopravy SR. Online. Dostupné na: https://www.brokerske-centrum.uniza.sk/doc/Zaverecna_sprava_Aktivita_1.5.pdf [citované 2025-01-24].
- [20] P.B. Ober (bez dát). Online. Dostupné na: <http://www.integricom.nl/documents/ION%20GPS%201996%20New%20Metrics%20for%20RAIM%20performance%20.pdf> [citované 2025-01-24].
- [21] GMV (2011). Online. Dostupné na: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Aviation_Applications [citované 2025-01-25].
- [22]
- [23] Jakub Machuta (2016). Priblížení SBAS, jeho avionika a porovnaní s ostatnými systémami. Online. Dostupné na: <https://core.ac.uk/download/pdf/47184753.pdf> [citované 2025-01-26].

- [24] Aim.rlp (2023). Online. Dostupné na: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10i/data/effective/dodD.pdf> [citované 2025-01-28].
- [25] Skybrary (bez dáta). Ground Based Augmentation System (GBAS). Online. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/ground-based-augmentation-system-gbas> [citované 2025-01-28].
- [26] GMV (2011). Online. Dostupné na: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ground-Based-Augmentation-System-\(GBAS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ground-Based-Augmentation-System-(GBAS)) [citované 2025-01-30].
- [27] Vladimír SEDLÁK (2019). GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SATELITNÉ SYSTÉMY pre geoinformatiku. Online. Dostupné na: https://uge-share.science.upjs.sk/webshared/uge_web_files/studium/ucebnice_skripta/2019_051_PF_GlobalneNavigacne_VN_UTRO.pdf [citované 2025-02-02].
- [28] Ing. PISCA Peter, PhD. (2005). GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SYSTÉMY. Online. Dostupné na: https://svf.uniza.sk/kgd/subory/skripta/GNSS/Globalne_navigacne_systemy.pdf [citované 2025-02-02].
- [29] Mingyu Kim, Jeongrae Kim (2021). Online. Dostupné na: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/1/151> [citované 2025-02-03].
- [30] Chris Shieff (2021) What's the deal with GLS approaches?. Online. Dostupné na: <https://ops.group/blog/whats-the-deal-with-gls-approaches/> [citované 2025-02-04].
- [31] Skybrary (bez dáta). GBAS Landing System (GLS). Online. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/gbas-landing-system-gls> [citované 2025-02-04].
- [32] Engineeringpilot. (2022). Online. Dostupné na: <https://www.engineeringpilot.com/post/gls-a-landing-system-struggling-to-take-off> [citované 2025-02-06].
- [33] J. Sanz Subirana, JM. Juan Zornoza, M. Hernandez-Pajares (2011). GNSS signal. Online. Dostupné na: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_signal [citované 2025-02-07].
- [34] VUT v Brne. (2011). Online. Dostupné na: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42738.pdf [citované 2025-02-10].
- [35] Monika Tináková (2017). Online. Dostupné na: <https://vedanadosah.cvtisr.sk/technika/informacne-a-komunikacne-technologie/gps-global-positioning-system/> [citované 2025-02-10].
- [36] NÚKIB (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://nukib.gov.cz/cs/galileo-prs/program-galileo/> [citované 2025-02-12].
- [37] BC. Ivana Stolarová (2016). TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI VÝŠEK MĚŘENÝCH TECHNOLOGIÍ GNSS. Online. Dostupné na: <https://theses.cz/id/oy5dxn/32347.pdf> [citované 2025-02-13].
- [38] The Economist (bez dáta). No jam tomorrow. Online. Dostupné na: <https://www.economist.com/news/technology-quarterly/18304246-navigation-usessatellite-> [citované 2025-02-14].
- [39] Ján Veľčický (2023). DETEKCIA RUŠENIA SIGNÁLU GNSS NA LETISKÁCH. Online. Dostupné na: <https://drepo.uniza.sk/server/api/core/bitstreams/7a28341e-ab96-4c0c-8a16-1e588b10f01d/content> [citované 2025-02-15].
- [40] Spionsvet (bez dáta). RUŠIČKY SIGNÁLU. Online. Dostupné na: <https://www.spionsvet.sk/rusicky.k125.html> [citované 2025-02-15].
- [41] Alex Carter (bez dáta). GNSS Jamming. Online. Dostupné na: <https://www.szmjdammer.com/cs/blog/gnss-jamming/> [citované 2025-02-20].
- [42] Silvio Semanjski, Ivana Semanjski, Wim De Wilde, Alain Muls (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7070933/> [citované 2025-02-20].
- [43] Hexagon (bez dáta). Spoofing. Online. Dostupné na: <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss-threats/spoofing> [citované 2025-02-25].
- [44]
- [45] Travis Turgeon (2024). GNSS Spoofing. Online. Dostupné na: <https://www.gnssjamming.com/post/gnss-spoofing> [citované 2025-02-27].
- [46] Peter Vnuk (2024). Rušenie navigačných signálov ovplyvňuje aj bežných ľudí. Online. Dostupné na: <https://www.trend.sk/technologie/gps-vojna-rusenie-navigacnych-signalov-ovplyvnuje-aj-bezných-ludi> [citované 2025-03-02].
- [47] Haijun Huang, Kewen Sun (bez dáta). Online. Dostupné na: https://uge-share.science.upjs.sk/webshared/Vyucba/GNSS/GNSS_2023/GNSS_3_4.pdf [citované 2025-03-02].
- [48] GPS.GOV (2012). Online. Dostupné na: <https://www.gps.gov/multimedia/presentations/2012/03/WSTS/> [citované 2025-03-04].
- [49] Magdaléna Kohoutová (2024). Online. Dostupné na: <https://ct24.ceskatelevize.cz/clanek/svet/polsko-zasahly-vypadky-gps-signalu-spekuluje-se-ze-je-za-nimi-rusko-345114> [citované 2025-03-06].

- [50] Filip Maxa (2024). Tajomné výpadky GPS. Online. Dostupné na: <https://zive.aktuality.sk/clanok/ZgyFUjs/tajomne-vypadky-gps-signaluzaznamenali-vo-viacerych-krajinach-ako-je-to-na-slovensku/> [citované 2025-03-10].
- [51] doc. Ing. Michal Kačmařík, Ph.D. (bez data). POKROČILÉ METODY LOKALIZACE A NAVIGACE A JEVI A FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU GNSS MĚŘENÍ. Online. Dostupné na: https://geoinformatika-1.vsb.cz/pmln/prednasky/02_vlivy_na_mereni.pdf [citované 2025-03-12].
- [52] Robert MINAŘÍK (2013). HODNOCENÍ PŘESNOSTI GNSS PŘÍSTROJŮ V ZÁVISLOSTI NA JEJICH KONFIGURACI. Online. Dostupné na: <https://theses.cz/id/vcz63a/00179005-878098105.pdf> [citované 2025-03-20].
- [53] Vladimír Sedlák (2017). GNSS. Online. Dostupné na: <https://unibook.upjs.sk/img/cms/2017/pf/gnss-web.pdf> [citované 2025-03-25].
- [54] Alex Carter (bez data). Rušička a blokátor signálu GPS. Online. Dostupné na: <https://www.szmidjammer.com/sk/blog/1575-mhz-gps-jammer/> [citované 2025-03-29].
- [55] NEWS (2024). Online. Dostupné na: <https://sk.txjammer.com/news-show-1042999.html> [citované 2025-03-26].
- [56] ICAO (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2024/NACCWG9/NACCWG9-D01-GPSJAM.pdf> [citované 2025-03-28].
- [57] Flightradar24 (bez data). GPS jamming map. Online. Dostupné na: <https://www.flightradar24.com/blog/inside-flightradar24/gps-jamming-map/> [citované 2025-04-05].
- [58] Peter Hupka (2020). Online. Dostupné na: <https://touchit.sk/cina-konecne-vyniesla-posledny-satelit-navigacneho-systemu-beidou/296840> [citované 2025-04-06].
- [59] Pavel Krupka (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.svetoutdooru.cz/galerie/gps-ma-konkurenci-satelitni-navigacni-systemy-se-rozrustaji-2/obrazek/53378/> [citované 2025-04-08].
- [60] Iotallknow (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.iotallknow.com/su/beidou-satellite-navigation-system/> [citované 2025-04-08].
- [61] GSSC (bez data). Online. Dostupné na: https://gssc.esa.int/navipedia/images/6/60/SBAS_Service_Areas_2021.PNG
- [62] José Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani (bez data). Online. Dostupné na: https://www.researchgate.net/figure/Ground-Based-Augmentation-System-GBAS-space-segment-satellites-airborne-segment-and_fig1_312304001 [citované 2025-04-08].
- [63] Chris Rizos (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.unsw.edu.au/engineering/sage> [citované 2025-04-11].
- [64] PennState (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1874> [citované 2025-04-11].
- [65] Rudolf Katona (2019). Online. Dostupné na: <https://slideplayer.com/slide/14025302/> [citované 2025-04-12].
- [66] The economist (2011). Online. Dostupné na: <https://www.economist.com/technology-quarterly/2011/03/12/no-jam-tomorrow> [citované 2025-04-12].
- [67] Wahyudin Syam (2022). Online. Dostupné na: <https://www.wasyresearch.com/meaconing-the-most-common-type-of-gnss-spoofing-interference-attacks/> [citované 2025-04-13].
- [68] Kaspersky (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.kaspersky.com/resource-center/definitions/spoofing> [citované 2025-04-15].
- [69] Drone republic (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.dronerepublic.sk/dji-mini-4-pro--dji-rc-2/> [citované 2025-04-17].
- [70] RCprofi (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.rcprofi.sk/rc-dron-dji-mavic-2-pro> [citované 2025-04-17].
- [71] GPSjam (bez data). Online. Dostupné na: <https://gpsjam.org/> [citované 2025-04-18].
- [72] Flightradar24 (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.flightradar24.com/data/gps-jamming> [citované 2025-04-17].
- [73] Dronerepublic (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.dronerepublic.sk/dji-mini-4-pro/> [citované 2025-04-18].
- [74] Dronerepublic (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.dronerepublic.sk/dji-mavic-2-pro/> [citované 2025-04-18].
- [75] Solactive (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.solactive.com/Indices/?index=DE000SLOBQ78> [citované 2025-04-19].
- [76] SZMID (bez data). Online. Dostupné na: <https://www.szmidjammer.com/sk/blog/jam-gps/> [citované 2025-04-21].



PERSPEKTÍVY ROZVOJA OBCHODNÉHO LETECTVA VO VYBRANÝCH KRAJINÁCH SVETA

Andrej Timotej Senaj
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Anna Tomová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This paper deals with the analysis of the prospects of business aviation in developing Asian countries, namely in India and the People's Republic of China. In the paper, a systematic overview of the current state of civil aviation and business aviation in both analyzed countries is presented, focusing on historical context, economic development, regulatory environment, airport infrastructure and commercial aviation segment. Particular attention is paid to the identification of stimulating and restrictive factors acting on the demand-side and supply-side that influence the development of business aviation. While India is mainly facing infrastructure, customs and tax barriers, in China, a major limitation is an airspace control and low flexibility of flight operations. At the same time, the paper formulates recommendations for policy and sectoral actors in order to create prerequisites for more efficient growth of business aviation, thereby contributing to the development of the business environment, regional connectivity and economic competitiveness of both countries.

Keywords

Business aviation, India, China, SWOT, Business model

1. Úvod

Obchodné letectvo (angl. *business aviation*) predstavuje významný segment všeobecného letectva, ktorý je neoddeliteľnou súčasťou moderného globálneho dopravného systému a plní špecifické potreby podnikateľskej, korporátnej a individuálnej klientely.

V tomto článku sú uvedené zistenia vyplývajúce z prehľadu vedeckej literatúry o rozvoji civilného letectva v Indii a v Číne s osobitným zameraním na segment civilného letectva. Následne sú identifikované brzdiace a stimulačné faktory pre rozvoj obchodného letectva v oboch krajinách a je spracovaná SWOT analýza rozvoja obchodného letectva pre obe krajiny.

2. Prehľad vedeckej literatúry o rozvoji civilného letectva v Indii a Číne

2.1. Rešerš vedeckej literatúry o rozvoji civilného letectva v Indii

Analýza odborných článkov zameraných na legislatívny rámec indického sektora civilného letectva preukázala, že tento sektor čelí významným regulačným obmedzeniam, ktoré limitujú jeho dynamický rozvoj. Z celkového počtu 31 vedeckých článkov uvedených v tabuľke 1, sa 22 článkov nezaobrá obchodným letectvom ani formou zmienky. Táto skupina článkov je však dôležitá pre pochopenie celkového kontextu stavu a rozvoja civilného letectva v Indii, čo je dôležité aj pre obchodné letectvo. Základnými zisteniami z týchto článkov sú :

Autori Vattipalli et al. [1] a Dwiwedi et al. [2] popísali indický letecký sektor, ktorý bol dlhé obdobie riadený v rámci inštitucionálneho rámca definovaného primárne prostredníctvom **Aircraft Act z roku 1934** a následných **Aircraft Rules z roku 1937**, pričom vykonávacím a dozorným orgánom je **Directorate General of Civil Aviation (DGCA)**. Tieto predpisy však boli opakovane kritizované za svoju zastaranosť a obmedzenú mieru adaptácie na súčasné technologické, komerčné a environmentálne výzvy. Z viacerých odborných publikácií vyplýva potreba hlbšej legislatívnej reformy¹, ktorá by zabezpečila pružnejšie riadenie civilného letectva a zároveň posilnila regulačné kapacity a transparentnosť rozhodovacích procesov.

Dôležitým zistením je, že napriek rastu trhu pretrvávajú v indickom letectve **značné infraštruktúrne deficit**. Mnohé regionálne letiská trpia nedostatkom moderného vybavenia, absenciou FBO (Fixed-Base Operators) a nízkou úrovňou kapacít pre všeobecné a obchodné letectvo. Analýzy opakovane poukazujú na **nerovnomerné rozloženie investícií** medzi hlavné metropolitné centrá a zvyšok krajiny, čo vytvára značné disproporcie v dostupnosti leteckých služieb.

Významnú úlohu v modernizácii odvetvia zohráva proces **privatizácie letiskovej infraštruktúry**. Tento výskum bol realizovaný prostredníctvom modelov verejno-súkromného partnerstva (PPP). Prípadové štúdie letísk v Dillí, Hyderabad a Bangalore ukazujú, že privatizácia viedla k zlepšeniu služieb, zvýšeniu neleteckých výnosov a efektívnejšiemu riadeniu letiskových činností [3] [4].

Environmentálny rozmer civilného letectva získava v posledných rokoch čoraz väčšiu pozornosť. Štúdie z rokov 2022 a 2023

¹ Posledná novelizácia Aircraft Act bola v roku 2022 a Aircraft Rules v roku 2019.

poukazujú na rozvoj iniciatív v oblasti **udržateľného letectva**, vrátane implementácie alternatívnych palív (SAF) a digitalizačných technológií znižujúcich emisie a spotrebu paliva. Tieto iniciatívy však zatiaľ prebiehajú najmä v pilotných projektoch bez systematickej štátnej podpory [5] [6].

Napokon, dôležité poznatky priniesli aj publikácie venujúce sa **socio-ekonomickým a technologickým aspektom** letectva, ktoré identifikovali pozitívne korelácie medzi rozvojom leteckého sektora a regionálnym HDP, ako aj význam zahraničných investícií (FDI) pre rozšírenie kapacít údržby, výcviku a leteckých služieb [7] [8].

Tieto poznatky vytvárajú základ pre hlbšie porozumenie systémových faktorov ovplyvňujúcich rozvoj civilného a obchodného letectva v Indii, a zároveň poukazujú na potrebu komplexného prístupu, ktorý integruje legislatívnu reformu, podporu infraštruktúry, technologické inovácie a environmentálne udržateľné riešenia.

Z celkovo 31 článkov boli priamo zamerané na obchodné letectvo v Indii len dva články. **Článok autora Mathur (2012) - General Aviation Unfolding Horizons** konštatuje, že sektor všeobecného letectva (general aviation, GA) v Indii vykazuje výrazný rastový potenciál a jeho hodnota by mohla do konca fiškálneho roka 2016/2017 presiahnuť 16 miliárd INR. Tento vývoj je poháňaný rastúcim počtom lietadiel – **očakávala sa flotila približne 300 biznis jetov, 300 malých lietadiel a 250 vrtuľníkov**. Kľúčovým faktorom očakávaného rastu flotily typickej pre segment obchodného letectva tohto rastu je narastajúci počet osôb s vysokým majetkom (HNWI) a zvyšujúci sa dopyt po efektívnom prepojení medzi veľkými mestami a menšími regionálnymi centrami. Napriek pozitívnym predpokladom však sektor čelí viacerým výzvam. Medzi najzásadnejšie patrí nedostatočná infraštruktúra – **viac než 150 letísk nie je adekvátne vybavených pre prevádzku všeobecného letectva**. Ďalšou bariérou sú regulačné obmedzenia týkajúce sa dovozu lietadiel, ktoré spomaľujú modernizáciu flotily. Hoci indická vláda povoľuje 100 % priamych zahraničných investícií (FDI) v oblasti údržby (MRO) a výcvikových centier, sektor stále stráca ciele nastavené daňové stimuly. Pre podporu zdravého rozvoja systému všeobecného letectva je nevyhnutné zriadenie plnohodnotných staníc FBO (Fixed-Base Operators) a modernizácia letiskovej infraštruktúry [9].

Článok **Business Aviation in India: Still chasing the potential** hovorí o Správe združenia prevádzkovateľov obchodných lietadiel (BAOA). Poukazuje na skutočnosť, že **sektor obchodného letectva (business aviation, BA) v Indii za päť rokov (2007 až 2012) zaznamenal len minimálny rast na úrovni približne 2 %**, čo ostro kontrastuje s dynamickým rozvojom pravidelných komerčných leteckých liniek. Dokument pritom zdôrazňuje kľúčový význam obchodného letectva pre hospodársky rozvoj krajiny, pričom ho **identifikuje ako nevyhnutný nástroj na zabezpečenie regionálnej prepojenosti a podporu národného rastu**. Medzi hlavné odporúčania správy patrí zrušenie dovozných ciel na lietadlá, ako aj posilnenie inštitucionálnej kapacity riadiaceho orgánu DGCA (Directorate General of Civil Aviation). Zároveň sa navrhuje podpora modelu frakčného vlastníctva, ktorý by zvýšil dostupnosť lietadiel pre širšiu skupinu používateľov, a využívanie obchodných lietadiel na účely urgentnej zdravotnej prepravy

2.2. Rešerš vedeckej literatúry o rozvoji civilného letectva v Číne

Vývoj letectva v Číne prešiel dlhým a zložitým procesom, ktorý zahŕňa ako všeobecné letectvo, tak aj komerčné letectvo. Sektor čínskeho letectva čelil mnohým výzvam, no súčasne zaznamenáva rýchly rast, ktorý je podporený štátnymi reformami a investíciami do infraštruktúry.

Článok autorov Zhang & Diao z roku 2013 sa venuje analýze legislatívnych nedostatkov v zákone o všeobecnom letectve, ktoré bránia ďalšiemu rozvoju tohto sektora: *„Nedostatok jasných právnych rámcov pre regulácie vzdušného priestoru a infraštruktúru letísk predstavuje prekážku pre rozvoj všeobecného letectva“* [10]. Okrem toho autori Zhu et al. v článku z roku 2017 upozorňujú na potrebu zlepšiť reguláciu a výstavbu letísk, ako aj na potrebu kvalitnejšej odbornosti a pilotov, aby bol sektor udržateľný a konkurencieschopný na medzinárodnom trhu [11].

Všeobecné letectvo v Číne, ktoré zahŕňa civilné lietadlá využívané na rôzne účely, ako sú poľnohospodárske, záchranné, vzdelávacie a iné činnosti, čelí viacerým problémom. Autor Hu v článku z roku 2015 identifikuje hlavné prekážky, ako je nedostatok pilotov a výcvikových zariadení, ako aj obmedzený vzdušný priestor, ktorý brzdí expanziu tohto sektora. Napriek týmto výzvam konštatuje, že došlo k pozitívnym zmenám v oblasti politických a legislatívnych reforiem, ktoré umožnili rozvoj všeobecného letectva: *„Všeobecné letectvo, ktoré zohráva významnú úlohu v civilnom letectve a záchranných službách, čelí štrukturálnym výzvam, ale vďaka nedávnym reformám rastie“* [12].

Dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje čínske letectvo, je aj konkurencia zo strany iných druhov dopravy, najmä vysokorýchlostných železníc (HSR). Autori Li et al. v štúdiu z roku 2019 ukázali, že rýchly rozvoj HSR v Číne vedie k poklesu pasažierov na trasách, kde sú letecké a železničné služby konkurentmi. Tento trend naznačuje, že vysokorýchlostné železnice sa stávajú silným konkurentom pre krátke a stredné letecké trasy, najmä v oblastiach, kde je HSR už dostupné [13].

V rámci rozvoja čínskeho letectva zohráva dôležitú úlohu aj reforma vzdušného priestoru. Autori Liao et al. (2020) vo svojej štúdiu predpokladajú, že tento sektor bude naďalej rásť vďaka reformám a rozvoju infraštruktúry, ako aj otvoreniu ďalších letísk a zlepšeniu legislatívy: *„Reformy v nízko letovom vzdušnom priestore majú zásadný význam pre expanziu čínskeho všeobecného letectva“*. Tieto reformy majú podporiť nielen expanziu leteckej dopravy, ale aj zlepšiť dostupnosť rôznych regiónov Číny prostredníctvom leteckých spojení [14].

Článok autora Brazelton z roku 2021 zdôrazňuje potrebu technického vzdelávania a školenia odborníkov, ktoré bolo a bude kľúčové pre podporu rozvoja letectva (Brazelton, 2021).

Všetky tieto faktory naznačujú, že čínske letectvo čelí viacerým výzvam, ktoré sa však môžu riešiť prostredníctvom politických, legislatívnych a technologických inovácií. Významné investície do infraštruktúry a vzdelávania odborníkov, spolu s ďalšími reformami v oblasti vzdušného priestoru, môžu pomôcť Číne dosiahnuť udržateľný rozvoj leteckého sektora.

Autori Zhang a Diao v článku z roku 2013 konštatovali, že čínske obchodné letectvo vykazuje síce rastúci dopyt, avšak jeho

expansion je značne obmedzená štrukturálnymi a regulačnými prekážkami. Napriek tomu, že od reformy ekonomiky sa počet miliónárov a potenciálnych klientov pre súkromné a obchodné lety významne zvýšil, rozvoj infraštruktúry a regulačného rámca nedokáže držať krok s rastom ekonomiky. Čínska vláda postupne začala uznávať strategický význam všeobecného letectva a obchodného letectva. V roku 2010 bol predstavený plán na **uvoľnenie vzdušného priestoru**, v ktorom sa objavili niektoré nové nariadenia s cieľom podporovať rast odvetvia všeobecného letectva, pričom jedným z príkladov je „*názory na prehĺbenie reformy nízkej nadmorskej výšky riadenia letového priestoru*“, ktorý v roku 2010 spoločne vydala štátna rada a Ústredný vojenský výbor Číny čo malo podnietiť vznik viac ako 20 špecializovaných zón pre rozvoj letectva. Tieto zóny spájajú výrobu, vývoj, predaj a údržbu leteckej techniky [10].

Výskum autorov Fanjoy a Gao z roku 2007 konštatoval, že medzi hlavných prevádzkovateľov obchodného letectva patrili **Deer Jet, Sino Jet, Beijing Capital Airlines Business Jet, a Shanghai Airlines Business Jet**, pričom v roku 2007 existovalo len niekoľko desiatok prevádzkovateľov biznis jetov. Flotila týchto spoločností pozostávala prevažne z typov ako Gulfstream, Challenger, Hawker alebo Learjet. Rovnako tento výskum charakterizoval kľúčové prekážky rozvoja čínskeho obchodného letectva, medzi ktoré patria:

- **obmedzený prístup** do vzdušného priestoru, ktorý je vo veľkej miere kontrolovaný armádou,
- **vysoké náklady** na prevádzku a údržbu biznis lietadiel,
- **nedostatočné množstvo skúsených pilotov a tréningových inštitúcií** – čo priamo ovplyvňuje rast trhu s biznis lietadlami [16]

Obchodné letectvo v Číne disponuje výrazným potenciálom, ktorý je však podmienený reformami regulačného rámca, liberalizáciou vzdušného priestoru a investíciami do infraštruktúry a personálu. Kým dopyt je stimulovaný ekonomickým rastom a globálnymi ambíciami čínskych korporácií, ponuka naráža na systémové a kultúrne bariéry. Perspektívne môže ísť o jeden z najrýchlejšie rastúcich segmentov leteckého trhu, ak dôjde k efektívnej implementácii vládnych politík a deregulácií.

3. Obmedzujúce a stimulačné faktory pre rozvoj obchodného letectva v Indii a Číne

India a Čína sú dve dynamicky sa rozvíjajúce ekonomiky a letecké trhy, ktorých rastúci význam na globálnom trhu (aj leteckom) je čoraz evidentnejší. V porovnaní so Spojenými štátmi americkými, ktoré predstavujú najrozvinutejší systém obchodného letectva na svete, je stav obchodného letectva v týchto krajinách na nižšej úrovni z hľadiska viacerých aspektov. V USA je registrovaných viac ako 14 000 biznis jetov a v krajine je viac ako 5 000 letísk, z ktorých mnohé sú prispôbené výlučne pre všeobecné a obchodné letectvo. Reguláciu vykonáva Federal Aviation Administration (FAA), pričom sektor je podporovaný vysokou mierou liberalizácie a podnikateľskej voľnosti. USA sú zároveň domovom najväčších

prevádzkovateľov ako NetJets, VistaJet či Wheels Up, a z hľadiska organizácie vzdušného priestoru a dostupnosti letísk predstavujú referenčný štandard, ku ktorému sa ostatné štáty približujú s odstupom niekoľkých desaťročí.

3.1. Stimulačné faktory dopytu

3.1.1. Stimulačné faktory dopytu – India

V prípade Indie je rastúci dopyt po obchodnom letectve podporovaný najmä narastajúcou skupinou jednotlivcov s vysokou čistou hodnotou majetku (High-Net-Worth Individuals – HNWI). Podľa Capgemini Wealth Report India patrí medzi krajiny s najrýchlejšie rastúcim počtom miliónárov, čo významne zvyšuje potenciál trhu. Ďalším podstatným faktorom je regionálna disproporcia v dostupnosti pravidelnej leteckej dopravy, čo vytvára priestor pre flexibilné riešenia na báze biznis letectva. Vysoká úroveň urbanizačných procesov a ekonomickej diverzifikácie podporuje aj dopyt zo strany manažmentov nadnárodných korporácií a domácich koncernov, ktoré vyžadujú efektívnu mobilitu medzi ekonomickými centrami a odľahlejšími lokalitami.

- Rastúci počet HNWI (High-Net-Worth Individuals)
- Nedostatočná regionálna konektivita
- Zvýšenie potreby mobility vrcholového manažmentu

3.1.2. Stimulačné faktory dopytu – Čína

V čínskom kontexte je dopyt stimulovaný najmä prudkým nárastom bohatstva v mestských oblastiach a rastúcim počtom HNWI, čo potvrdzuje aj Hurun Global Rich List. Tento trend je zosilnený ambíciou čínskych podnikov expandovať na zahraničné trhy, čo si vyžaduje flexibilitnú a diskretnú formu leteckej prepravy. Dôležitý vplyv majú aj štátom podporované politiky na rozvoj všeobecného letectva, ktoré vytvárajú priaznivé predpoklady pre rast segmentu obchodného letectva.

- Rast bohatstva, urbanizácia
- Nedostatok BA letov pre manažment
- Podpora vládnych cieľov

3.2. Obmedzujúce faktory dopytu

3.2.1. Obmedzujúce faktory dopytu – India

Obmedzenia na strane dopytu v indickom prostredí predstavuje predovšetkým daňová a colná politika – najmä vysoké clo na import lietadiel, ktoré sa pohybuje medzi 28 až 35 %². Tieto opatrenia výrazne predražujú obstaranie leteckej techniky. Ďalším limitujúcim faktorom je zložitosť regulačných procesov (napr. udeľovanie povolení, kontrola letových trás), ako aj nízka

² India nie je signatárom dohody WTO Agreement on Trade in Civil Aircraft, ktorá neumožňuje signatárom vyberať dovoznú clá

a uplatňovať kvantitatívne obmedzenia dovozu. (India má len štatút pozorovateľa.)

úroveň všeobecného povedomia a akceptácie obchodného letectva medzi širšou podnikateľskou komunitou.

- Vysoké daňové zaťaženie
- Nízka kultúra využívania BA
- Nejednoznačné regulačné prostredie

3.3. Stimulačné faktory ponuky

3.3.1. Stimulačné faktory ponuky – India

Ponuka obchodného letectva v Indii profituje z liberalizačných krokov vlády, ktorá od roku 2016 umožňuje 100 % priamych zahraničných investícií (FDI) v sektoroch MRO (údržba a oprava lietadiel) a výcviku pilotov. Rozvíjajú sa aj infraštruktúrne projekty vrátane výstavby špecializovaných terminálov FBO v hlavných mestách. Diskusia o zavedení frakčného vlastníctva a jeho regulačnom ukotvení predstavuje ďalší krok smerom k liberalizácii a diverzifikácii trhu.

- 100% FDI povolené v sektoroch MRO a výcvikových centier
- Rozvoj FBO a infraštruktúry
- Vláda začala diskutovať o frakčnom vlastníctve a deregulácii

3.3.2. Stimulačné faktory ponuky – Čína

Čínske autority realizujú rozsiahle investície do budovania leteckej infraštruktúry vrátane moderných FBO terminálov v metropolách ako Peking, Šanghaj a Šen-čen. Vznik a expanzia domácich poskytovateľov (napr. Deer Jet, Sino Jet, Metrojet) ukazujú zvyšujúcu sa ponukovú kapacitu sektora. Významným aspektom je aj rozvoj domáceho výrobcu lietadiel COMAC, ktorého produkty môžu v budúcnosti výrazne znížiť náklady na obstaranie lietadiel a prispieť k lokalizácii dodávateľských reťazcov.

- Budovanie stimulačných bizjet terminálov
- Nárast počtu domácich prevádzkovateľov BA
- Domáca výroba lietadiel COMAC

3.4. Obmedzujúce faktory ponuky

3.4.1. Obmedzujúce faktory ponuky – India

Najväčším limitom je nedostatočná sieť letiskovej infraštruktúry a absencia kvalitných FBO na väčšine regionálnych letísk. V kombinácii s administratívne náročnými procesmi pri registrácii a prevádzke lietadiel to spôsobuje vysoké transakčné náklady a nízku mieru participácie zo strany investorov. Nedostatok kvalifikovaných pilotov a technického personálu špecializovaného na GA všeobecné letectvo je ďalším obmedzujúcim faktorom.

- Nedostatok FBO a MRO

- Slabá infraštruktúra na sekundárnych letiskách
- Nedostatok profesionálnych pilotov pre segment všeobecného letectva

3.4.2. Obmedzujúce faktory ponuky – Čína

Kritickým obmedzením je fakt, že väčšina vzdušného priestoru je pod kontrolou vojenských zložiek (PLAAF), čo značne znižuje flexibilitu letových prevádzok. Prevádzkovatelia musia vopred získať schválenie letových plánov, ktoré sú viazané na presne vymedzené koridory. Okrem toho neexistuje jednotný regulačný rámec pre všeobecné letectvo, čo komplikuje zakladanie nových subjektov a obmedzuje inovácie.

- Dominancia štátu v riadení vzdušného priestoru
- Nízka hustota letísk vhodných pre bizjet
- Výrazný pokles lietadlovej flotily

4. SWOT analýza obchodného letectva v Indii a Číne

V záujme komplexného zhodnotenia súčasného postavenia obchodného letectva v Indii a Číne bola spracovaná SWOT analýza, ktorá identifikuje kľúčové silné a slabé stránky, ako aj potenciálne príležitosti a hrozby spojené s rozvojom tohto segmentu v oboch krajinách. Tento analytický rámec umožňuje systematické porovnanie vnútorných a vonkajších faktorov, ktoré ovplyvňujú schopnosť týchto ekonomík uplatniť obchodné letectvo ako strategický nástroj hospodárskeho rozvoja, regionálnej konektivity a technologickej modernizácie.

Tabuľka 1 - SWOT analýza obchodného letectva v Indii a Číne

Faktory	India	Čína
Silné stránky	Rastúca skupina HNWI, priaznivá demografia, vládna podpora pre MRO a výcvik pilotov	Najväčší počet HNWI v Ázii, rozvinutá infraštruktúra FBO, štátne investície
Slabé stránky	Vysoké clo na dovoz lietadiel, slabá infraštruktúra FBO, pomalé regulačné procesy	Silná kontrola vzdušného priestoru armádou, negatívna verejná percepcia luxusu
Príležitosti	Liberalizácia vlastníctva, rozvoj sekundárnych letísk. Rozšírenie frakčného vlastníctva	Vývoj domácich lietadiel COMAC, expanzia čínskych spoločností, rast záujmu o privátne lety
Hrozby	Politická nestabilita, slabá regulačná kapacita, environmentálne limity	Geopolitické napätie, vývoz kapitálu, obmedzenie medzinárodnej prevádzky

Zdroj: Vlastné spracovanie.

4.1. Odporúčania a návrhy rozvojových opatrení pre Indiu

Na základe identifikovaných faktorov možno navrhnúť niekoľko opatrení, ktoré by prispeli k dynamickejšiemu rozvoju obchodného letectva v Indii:

- **Zníženie colného a daňového zaťaženia** na dovoz biznis lietadiel a komponentov.
- **Zavedenie jednotného regulačného rámca** pre obchodné letectvo, vrátane transparentného systému udeľovania letových povolení.
- **Investície do regionálnych letísk** so zameraním na výstavbu FBO a údržbových zariadení.
- **Podpora vzdelávania a výcviku pilotov** špecializovaných na obchodné letectvo.
- **Podpora verejného povedomia** o význame obchodného letectva pre hospodársky rozvoj a regionálnu konektivitu.

4.2. Odporúčania a návrhy rozvojových opatrení pre Čínu

Vzhľadom na identifikované faktory je možné formulovať skupinu opatrení, ktoré by mohli významne podporiť rozvoj sektora obchodného letectva v Číne:

- **Liberalizácia vzdušného priestoru** – zvýšenie flexibility letov mimo kontrolovaných vojenských koridorov.
- **Zavedenie špecifických noriem pre prevádzku obchodného letectva** a posilnenie právneho rámca v oblasti vlastníctva lietadiel.
- **Podpora domácich výrobcov lietadiel** na vytvorenie dostupnejších modelov pre domáci trh.
- **Zvýšenie počtu FBO** a špecializovaných servisných centier v sekundárnych mestách a obchodných zónach.
- **Zvýšenie transparentnosti a dôvery** prostredníctvom regulovanej certifikácie operátorov.

Z uvedených poznatkov vyplýva, že obchodné letectvo v Indii a Číne má významný potenciál, ktorý však naráža na špecifické obmedzenia vyplývajúce z rozdielnych regulačných, ekonomických a kultúrnych podmienok. Kým India potrebuje predovšetkým zlepšiť infraštruktúru a znížiť finančné bariéry, Čína musí riešiť otázku prístupu k vzdušnému priestoru a celkovej liberalizácie trhu. V oboch prípadoch však obchodné letectvo predstavuje strategický nástroj podpory podnikania, investícií a regionálnej mobility, ktorý si zasluhuje cieľenú podporu štátu aj súkromného sektora.

5. Záver

Obchodné letectvo (business aviation) predstavuje vo vyspelých ekonomikách významný pilier všeobecného letectva, zatiaľ čo v rozvojových krajinách ako sú India a Čína, sa tento sektor nachádza vo fáze intenzívneho formovania

a inštitucionalizácie. Uskutočnený výskum potvrdzuje, že obchodné letectvo v oboch krajinách disponuje výrazným rozvojovým potenciálom, no súčasne čelí mnohým štrukturálnym, regulačným a infraštruktúrnym výzvam, ktoré brzdia jeho rozvoj.

Z hľadiska dopytových faktorov zohráva v oboch krajinách kľúčovú rolu rast populácie HNWI, zvyšujúce sa nároky na flexibilitu a efektívnu dopravu a potreba rýchleho prepojenie medzi metropolitnými a menej dostupnými regiónmi. Tieto faktory generujú dopyt po biznis letoch najmä v prostredí veľkých miest, rastúcich technologických centier a expanzívnych ekonomických klastrov. Na druhej strane však dopyt obmedzuje nízka kultúra využívania súkromného lietania, spoločenské vnímanie obchodného letectva ako symbolu luxusu a absencia stimulujúcich daňových a investičných mechanizmov.

Na strane ponuky je možné pozorovať prvé znaky liberalizácie – predovšetkým v oblasti MRO, výcviku pilotov, výstavby FBO terminálov a technologických inovácií. India umožňuje 100% FDI v niektorých odvetviach, zatiaľ čo Čína investuje do výroby domácich lietadiel a budovania špecializovaných leteckých oblastí. Napriek tomu ostáva ponuka limitovaná malým počtom registrovaných prevádzkovateľov, vysokými nákladmi na prevádzku lietadiel a prísny dohľadom štátu nad vzdušným priestorom (najmä v Číne).

SWOT analýza poukázala na to, že India aj Čína zdieľajú podobné silné a slabé stránky – ako je demografická výhoda, no zároveň slabá infraštruktúra a nízka regulačná predvídateľnosť. Príležitosti pre rozvoj sú predovšetkým vo forme frakčného vlastníctva, charterovej prevádzky a integrácie obchodného letectva do regionálnej dopravnej politiky. Hrozby spočívajú v geopolitickej nestabilite, environmentálnych reguláciách a rizikách spojených s nedostatkom kvalifikovaného personálu.

V porovnaní s referenčnou krajinou USA predstavuje trh obchodného letectva v Indii a Číne stále menej vyspelý, ale o to dynamickejšie prostredie, ktoré sa môže stať jedným z najvýznamnejších globálnych hráčov, ak dôjde k odstráneniu prekážok a k realizácii vhodne zvolených rozvojových politík.

Na základe zistení bola navrhnutá séria odporúčaní, ktoré zahŕňajú potrebu zjednodušenia colných a daňových procesov, zavedenia jednotného regulačného rámca pre obchodné letectvo, posilnenie pilotného výcviku a podpora výstavby FBO. Zároveň je nevyhnutné vytvoriť priaznivejšie podnikateľské prostredie pre menších prevádzkovateľov a implementovať obchodné letectvo do stratégií regionálneho a hospodárskeho rozvoja.

Záverom je možné konštatovať, že obchodné letectvo v Indii a Číne je viac než len doplnkom leteckej dopravy. Obchodné letectvo je strategický sektor s významným vplyvom na ekonomickú výkonnosť, investičnú atraktivitu a regionálnu konektivitu. Jeho ďalší rozvoj bude podmienený politickou vôľou, legislatívnou flexibilitou a schopnosťou sektora prispôbiť sa globálnym trendom, vrátane udržateľnej mobility, digitalizácie a decentralizácie dopravnej siete. Tento článok je príspevkom k budúcej diskusii o systéme obchodného letectva v kontexte transformujúcich sa trhov Ázie.

Referencie

- [1] U. Vattipalli, „Aviation Laws and Air Carrier Liabilities in India,” 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214652030418X>.
- [2] P. Dwivedi, „Navigating the Skies: An Overview of Aviation,” 2023. [Online]. Available: <https://www.ijfmr.com/papers/2023/6/11387.pdf>.
- [3] M. Ohri, „Airport Privatization in India,” 2012. [Online]. Available: https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A3%3A20992771/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A77058297&crl=c&link_origin=www.google.com.
- [4] P. S. A. Pavithra Kumari, „An Overview of the Aviation Industry in India with Special Emphasis on Privatization,” 2020. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3729975.
- [5] R. B. H. Vasavi Thummala, „Green aviation in India: Airline's implementation for achieving sustainability,” 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666784322000365>.
- [6] L. F. T. A. G. Jefferson dos Santos Estevo, „The Implementation of Sustainable Aviation Fuels (SAF) in the BASIC countries – Brazil, South Africa, India and China,” 2023. [Online]. Available: <https://publicacoes.softaliza.com.br/ise2023/article/view/4514>.
- [7] A. M. G Kalpana, „The Influence of FDI in Civil Aviation Sector in India,” 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/338449914_The_Influence_of_FDI_with_GDP_its_Impact_of_FDI_in_Civil_Aviation_Sector_in_India.
- [8] B. V. S. K. T. S. K. F. J. Ashutosh Kolte, „Exploring the Socio-Economic and Technological Situation of Indian Aviation Industry,” 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/336030362_EXPLORING_THE_SOCIO-ECONOMIC_AND_TECHNOLOGICAL_SITUATION_OF_INDIAN_AVIATION_INDUSTY.
- [9] pwc, „General Aviation: Unfolding Horizons,” 2012. [Online]. Available: <https://www.pwc.in/assets/pdfs/industries/general-aviation-070312.pdf>.
- [10] C. B. Zhang, „Deficiencies of China's General Aviation Law and its Improvement,” 2013. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/293197035_Deficiencies_of_China's_General_Aviation_Law_and_its_Improvement.
- [11] M. J. Y. S. Yongming Zhu, „Analysis on Current Development Situations, the Key Issues and Countermeasures of China's General Aviation Industry,” 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817302357>.
- [12] X. Hu, „GENERAL AVIATION IN CHINA,” 2015. [Online]. Available: <https://jewlscholar.mtsu.edu/server/api/core/bitstreams/dfdc3af8-3f05-42e3-830d-95edb74cd6a0/content>.
- [13] J. S. L. L. Hongchang Li, „The impact of high-speed rail on civil aviation in China,” 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X18303226>.
- [14] H. Liao, „Economic Development Forecast of China's General Aviation Industry,” 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/342446761_Economic_Development_Forecast_of_China%27s_General_Aviation_Industry.
- [15] M. A. Brazelton, „Aviation infrastructures in the Republic of China, 1920–37,” 2021. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0073275321995638>.
- [16] Y. G. Richard O. Fanjoy, „Collegiate Aviation in China: Opportunities and Challenges,” 2007. [Online]. Available: <https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1437&context=jaaer>.
- [17] WorldBank, „India,” [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/country/india>.
- [18] WorldBank, „China,” [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/country/china>.
- [19] WorldBank, „USA,” [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/country/united-states>.



SYSTÉM KONTROLY VSTUPU OSOB A VJEZDU VOZIDEL NA LETIŠTI LEOŠE JANÁČKA V OSTRAVĚ A POSOUZENÍ MOŽNOSTI JEHO ZLEPŠENÍ

Adéla Šimová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Karol Lysina
Dopravný úrad
Letisko M.R. Štefánika
823 05 Bratislava

Abstract

This article deals with access control of persons and vehicles at Leoš Janáček Airport in Ostrava. The focus is on the structure of airport security zones, requirements for authorized access, and relevant legislation in civil aviation. Based on the analysis of operating conditions and expert collaboration, the article proposes several improvements, including clearer zoning of entry points, enhanced control of both passengers and staff at access gates, modernization of vehicle checkpoint systems, and reinforcement of perimeter protection through physical and technical means. The recommendations are grounded in the current configuration at Ostrava Airport, including its use of ID card readers, turnstiles, CCTV monitoring, and security checkpoints for both personnel and vehicles. The aim is to strengthen the airport's security posture while maintaining functional and operational continuity.

Keywords

Airport access control, vehicle entry, perimeter protection, CPSRA, Ostrava Airport.

1. Úvod

Bezpečnost v oblasti civilního letectví je jedním z nejdůležitějších pilířů fungování moderní letecké dopravy. Letiště jako taková představují komplexní systémy, ve kterých dochází k interakci různých druhů dopravy, pohybu osob, zboží, techniky a informací. Každé letiště, ať už mezinárodního nebo regionálního významu, je současně bodem přístupu do systému mezinárodní mobility a zároveň strategickým bezpečnostním objektem. Z tohoto důvodu jsou ochranná opatření, která regulují pohyb osob a vozidel v areálu letiště, nezbytnou součástí každodenního provozu.

Tento článek se zaměřuje na systém kontroly vstupu osob a vjezdu vozidel do chráněných prostor Letiště Leoše Janáčka v Ostravě – konkrétně do vyhrazených bezpečnostních prostorů (SRA) a jejich kritických částí (CPSRA). Tato místa jsou ze své povahy klíčová pro zajištění plynulosti provozu a eliminaci rizik, která by mohla vést k narušení bezpečnosti letiště, cestujících nebo infrastruktury.

Bezpečnostní rizika, jako jsou neoprávněné vniknutí, sabotáže, špionáž nebo terorismus, patří mezi největší hrozby v letecké dopravě. Tyto hrozby nejsou pouze hypotetické – historie ukazuje, že k narušení bezpečnosti na letištích již došlo. Typickým příkladem je neoprávněný přístup k letadlům nebo k technickému zázemí, který může mít za následek nejen materiální škody, ale i ohrožení lidských životů. Ochrana letištního perimetru a striktní režim vstupu jsou proto klíčové prvky systému security – tedy ochrany civilního letectví před protiprávními činy.

Na základě zkušeností z Letiště Leoše Janáčka v Ostravě lze pozorovat, že ačkoliv stávající systém splňuje základní legislativní normy, existují oblasti, kde lze úroveň ochrany dále zefektivnit. A právě těmto možnostem zlepšení se věnuje hlavní část tohoto odborného článku.

Vzhledem ke skutečnosti, že Letiště Ostrava má status regionálního mezinárodního letiště, podléhá stejným evropským a národním bezpečnostním požadavkům jako ostatní mezinárodní letiště v Evropské unii. Výzvou je přitom sladit tyto požadavky s ekonomickou a personální realitou regionální infrastruktury, kde není vždy k dispozici stejné množství zdrojů jako například na Letišti Václava Havla v Praze. Je proto důležité hledat inteligentní řešení, která nejenže zajistí vysoký stupeň bezpečnosti, ale zároveň neomezí efektivitu provozu.

Význam systémové ochrany prostoru letiště roste i v souvislosti s digitalizací, která umožňuje nové formy hrozeb – např. kybernetické útoky na systémy řízení přístupu, falšování identifikačních údajů nebo zneužití datových přenosů. Vstupní kontrola proto nesmí být vnímána jako statická bariéra, ale jako dynamický proces, který musí být schopen reagovat na měnící se technologické i společenské podmínky.

V neposlední řadě hraje roli i lidský faktor – správná kvalifikace pracovníků bezpečnostních složek, jejich psychická způsobilost, školení a připravenost na mimořádné události. Technologické prostředky jsou důležitou složkou, avšak bez profesionálního personálu zůstávají pouze nástroji bez strategického vedení.

Cílem tohoto článku je shrnout současný stav systému vstupní kontroly na Letišti Leoše Janáčka v Ostravě, poukázat na možné nedokonalosti v navrhované zlepšení v rámci kontroly vstupu cestujících, jelikož ostatní kategorie kontrol jsou neveřejného charakteru.

2. Metodika a metody zkoumání

Cílem tohoto odborného článku je analyzovat současný systém kontroly vstupu osob a vjezdu vozidel na Letišti Leoše Janáčka v Ostravě, a na základě získaných poznatků navrhnout konkrétní opatření ke zlepšení úrovně bezpečnosti a efektivitě provozu v souladu s platnou legislativou v oblasti civilního letectví.

Důraz je kladen především na praktické fungování vstupních a kontrolních bodů, technické prostředky ochrany, režimová opatření a návaznost jednotlivých kontrolních mechanismů na legislativní požadavky. Zvláštní pozornost je věnována vstupu do kritických částí vyhrazeného bezpečnostního prostoru (CPSRA), které jsou z hlediska ochrany letiště nejcitlivější.

Pro účely zpracování této práce byla zvolena kombinace metod, které umožnily získat komplexní a zároveň prakticky orientovaný pohled na fungování systému kontroly vstupu osob a vjezdu vozidel na Letišti Leoše Janáčka v Ostravě. Základní metodou bylo osobní pozorování v konkrétní den, které probíhalo přímo v neveřejných prostorách letiště, zejména v okolí kontrolních stanišť, vjezdových závor a vstupních bodů do CPSRA. Tímto způsobem bylo možné sledovat reálný průběh procesů, organizaci činností, návaznost kontrolních prvků a interakci mezi lidským faktorem a technickými prostředky. V rámci pozorování jsme provedli interview s manažerem bezpečnosti letiště, s pracovníky letiště a s uživateli letiště.

Poznatky z pozorování a z interview byly dále doplněny analýzou vnitřní dokumentace letiště, především provozních předpisů, bezpečnostních protokolů, interních směrnic upravujících režim vstupu a vjezdu, a schémat rozmístění technických systémů.

3. Právní rámec a systémové požadavky

Bezpečnost civilního letectví v rámci Evropské unie je řízena souborem právních předpisů, které jsou závazné pro všechna letiště nacházející se na území členských států. Hlavním legislativním nástrojem je Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 300/2008, které stanovuje společná pravidla pro ochranu civilního letectví před protiprávními činy. Toto nařízení je dále upřesněno a doplněno Prováděcím nařízením Komise (EU) 2015/1998, které podrobně definuje konkrétní bezpečnostní opatření, požadavky na přístup do vyhrazených bezpečnostních prostor a provádění bezpečnostních kontrol.

Tyto předpisy mimo jiné určují:

- rozdělení letiště na veřejné a neveřejné prostory (Landside a Airside),
- zavedení vyhrazených bezpečnostních prostorů (SRA) a jejich kritických částí (CPSRA), kde je 100 % osob a vozidel podrobena bezpečnostní kontrole,
- podmínky pro vstup osob a vjezd vozidel, včetně nutnosti ověření spolehlivosti, vydání oprávnění a kontroly identifikačních průkazů,
- pravidla pro vydávání letištních identifikačních průkazů (IDC) a vjezdových povolení,
- požadavky na odbornou přípravu a školení bezpečnostního personálu.

Pro vstup do neveřejných prostorů letiště (např. CPSRA) je třeba splnit přísné bezpečnostní podmínky – osoby musí být držiteli platného IDC nebo jiného uznaného dokladu (např. palubní vstupenky, průkazu člena letové posádky apod.) a absolvovat tzv. ověření spolehlivosti (tzv. background check), které zahrnuje kontrolu bezúhonnosti a důvěryhodnosti žadatele. V

České republice je tento proces v gesci Úřadu pro civilní letectví (ÚCL), na Slovensku ho provádí Dopravní úřad.

V souvislosti s kontrolou vstupu platí, že vstup i vjezd do CPSRA je možný pouze na základě oprávněného důvodu a pouze v rozsahu, který odpovídá pracovní nebo provozní činnosti dané osoby nebo vozidla. Oprávnění musí být na požádání kdykoli předloženo, přičemž jeho platnost je omezená a vázaná na konkrétní prostory a časové období. Každé oprávnění podléhá evidenci, revizi a možnosti okamžitého zneplatnění.

Na úrovni mezinárodních předpisů pak veškeré požadavky vycházejí z Úmluvy o mezinárodním civilním letectví (tzv. Chicagská úmluva) a směrnic Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO). Zvláštní důraz je kladen na Přílohu 17 ICAO, která se věnuje ochraně civilního letectví před protiprávními činy (aviation security – AVSEC).

Z hlediska implementace na národní úrovni existují další podrobnosti uvedené v národním bezpečnostním programu ochrany civilního letectví (v ČR i SR), který je schvalován příslušnými leteckými autoritami a definuje místní úpravy a doplňující podmínky k aplikaci evropských nařízení. Tento program stanoví např. frekvenci fyzických kontrol perimetru, způsob značení bezpečnostních zón nebo rozsah odborné přípravy různých kategorií zaměstnanců.

V neposlední řadě je třeba zmínit, že právní rámec neřeší pouze vstup osob a vozidel, ale také samotné prostředky ochrany – od typů mechanických a elektronických zabezpečovacích systémů, přes provoz kamerových systémů (CCTV), až po podmínky pro skladování a zacházení s citlivými údaji, jako jsou biometrická data nebo záznamy z přístupových bodů.

Legislativní rámec tedy vytváří základní podmínky, které musí provozovatel letiště plnit. Na ně pak navazují interní bezpečnostní programy jednotlivých letišť, které přizpůsobují obecné požadavky konkrétním provozním a technickým podmínkám daného letiště – v tomto případě Letišti Leoše Janáčka v Ostravě.

4. Bezpečnostní ochrana a kontrola vstupu osob a vjezdu vozidel na Letišti Leoše Janáčka v Ostravě

Letiště Leoše Janáčka v Ostravě představuje významný regionální uzel pro osobní i nákladní leteckou dopravu a jako mezinárodní letiště podléhá přísným požadavkům v oblasti ochrany civilního letectví. Tato kapitola se zabývá současným stavem systému bezpečnostní ochrany, zaměřuje se na dělení prostor, metody kontroly vstupu i vjezdu, a posuzuje efektivitu používaných technických a organizačních opatření.

4.1. Rozdělení prostor letiště a bezpečnostní složky

Letiště je rozděleno do veřejné (Landside) a neveřejné (Airside) části. Neveřejný prostor zahrnuje také **vyhrazený bezpečnostní prostor (SRA)**, jehož součástí je **kritická část CPSRA**, kde je každý vstup i vjezd podmíněn bezpečnostní kontrolou. Tato zóna zahrnuje přímé okolí letadel, přístupové cesty k odbavovací ploše a další strategicky důležité oblasti.

Bezpečnostní dohled zajišťuje **Útvar bezpečnosti letiště**, jehož pracovníci jsou proškoleni podle příslušných evropských a národních předpisů a mají oprávnění provádět kontroly

oprávněnosti vstupu, bezpečnostní kontrolu osob a vozidel a pravidelnou kontrolu perimetru.

4.2. Kontrola vstupu osob

Kontrola vstupu osob do neveřejných prostor letiště, zejména do SRA a CPSRA, je jedním z klíčových opatření k zajištění vysoké úrovně ochrany civilního letectví. Tato kontrola není omezena pouze na fyzický vstup do prostoru, ale zahrnuje celý soubor předcházejících administrativních a provozních kroků – od žádosti o přístup až po jeho praktické využití na vstupním bodě.

Každá osoba, která vstupuje do neveřejných prostor letiště, musí disponovat platným oprávněním, jehož forma a rozsah jsou upraveny legislativou a interními předpisy letiště. Nejčastěji se jedná o:

- letištní identifikační průkaz (IDC),
- průkaz člena letové posádky Unie,
- povolení pro doprovázený vstup (např. pro návštěvy, techniky, kontrolní orgány),
- palubní vstupenku (pro cestující pouze do části SRA),
- identifikační průkazy regulačních nebo bezpečnostních složek (např. Policie ČR, ÚCL, celní správa).

Pro vydání IDC musí osoba absolvovat ověření spolehlivosti (background check) a odpovídající odbornou přípravu, která zahrnuje jak teoretickou část (znalost legislativy, bezpečnostních protokolů), tak praktický výcvik. Platnost průkazu je zpravidla omezena na jeden rok a je vázána na konkrétního zaměstnavatele i rozsah oprávnění.

Vstupní kontrolní body jsou rozmístěny v souladu s provozními a bezpečnostními potřebami letiště. Jsou vybaveny čtečkami identifikačních karet, turnikety, které umožňují vstup pouze jedné osoby na základě ověření oprávnění, vizuální kontrolou obsluhou nebo bezpečnostním pracovníkem, a systémy záznamu a evidence vstupu.

Za správný průběh kontroly vstupu odpovídá přímo pověřený bezpečnostní pracovník nebo jiný zaměstnanec letiště s platným oprávněním. Ti musí být schopni:

- ověřit platnost průkazu (datum, pravost, fotografie, přístupová oprávnění),
- identifikovat podezřelé chování nebo pokus o neoprávněný vstup,
- zajistit zadržení ztraceného, neplatného nebo zneužitého průkazu.

Kromě toho mají povinnost zaznamenat každý pokus o vstup, který nebyl umožněn, a v případě nutnosti vyrozumět další složky (např. útvar bezpečnosti letiště, Policii ČR). Letiště má zavedeno také režimové opatření pro návštěvy a osoby bez trvalého oprávnění ke vstupu. Tyto osoby mohou vstupovat pouze v doprovodu držitele IDC, který za ně nese plnou

odpovědnost. Doprovod se zaznamenává do vstupní knihy nebo elektronického systému.

Existují určité situace, kdy může být vstup umožněn zjednodušeným režimem – například při cvičení, zásahu složek IZS nebo státní návštěvě. V takových případech je však vždy vyžadováno, aby byl zajištěn přímý dohled oprávněné osoby nebo doprovod z útvaru bezpečnosti.

Speciální pozornost je věnována také zaměstnancům mimo pracovní dobu – systém je nastaven tak, aby umožnil vstup pouze v rámci stanoveného rozvrhu služeb nebo pracovních směn, a tím zamezil neoprávněnému vstupu osob mimo výkon povinností.

4.3. Kontrola vjezdu vozidel

Systém kontroly vjezdu vozidel do neveřejných prostor letiště, a především do CPSRA, je rovnocenně důležitý jako systém kontroly osob. Každé vozidlo, které vjíždí do regulovaného prostoru, musí být řádně evidováno, technicky schváleno a označeno platným vjezdovým povolením. Vjezdová oprávnění se vydávají individuálně pro každé konkrétní vozidlo, přičemž povolení obsahuje údaje o schválených prostorách, do nichž je vjezd povolen, a datum platnosti.

Na Letišti Leoše Janáčka v Ostravě probíhá kontrola vjezdu kombinací technických a manuálních metod. Základ tvoří závorové systémy a fyzická přítomnost obsluhy. Vjezd do SRA zpravidla probíhá bez asistence, pokud je systém schopen identifikovat vozidlo i řidiče a otevřít závoru automaticky. V případě vjezdu do CPSRA je ale povinností pracovníka bezpečnosti nejen zkontrolovat oprávnění vozidla, ale také ověřit identitu všech osob nacházejících se ve vozidle.

Z důvodu bezpečnosti a přehlednosti je každý vjezd zaznamenáván – buď prostřednictvím elektronické databáze, nebo pomocí kamerového systému. Záznam obsahuje čas, SPZ, jméno řidiče a cílový prostor. Tento přístup umožňuje zpětnou kontrolu a slouží také jako podklad v případě mimořádné události.

V některých případech by bylo vhodné uvažovat také o zavedení mobilních kamerových systémů, které by umožnily flexibilní kontrolu pohybu vozidel v různých částech letiště.

Podobně jako u vstupu osob platí i zde zásada legitimního důvodu pro vstup – žádné vozidlo nesmí vstoupit do neveřejného prostoru bez provozní nutnosti. Zamezení neoprávněného vjezdu je jedním z klíčových opatření ochrany letiště, protože každé vozidlo může představovat rizikový faktor.

4.4. Ochrana perimetru

Ochrana perimetru letiště představuje základní prvek fyzického zabezpečení, jehož hlavním cílem je zabránit neoprávněnému přístupu osob a vozidel do chráněných prostor letiště. Perimetr Letiště Leoše Janáčka v Ostravě je vymezen oplocením, které tvoří fyzickou hranici mezi letištěm a jeho okolím. Toto oplocení musí splňovat jak legislativní požadavky dle evropských nařízení, tak i provozní standardy odpovídající profilu letiště.

Oplocení letiště je realizováno jako mechanická zábrana s odpovídající výškou a doplňkovými ochrannými prvky, jako jsou

podhrabové překážky, žiletkové pásy nebo doplněné žiletkové spirály v horní části plotu. Kromě samotné mechanické bariéry je perimetr vybaven elektronickými bezpečnostními systémy, jejichž cílem je včasné odhalení pokusu o narušení.

Na klíčových místech se nacházejí detekční systémy, například infračervené závory nebo mikrovlnné senzory, které spustí poplach při přerušení signálu nebo narušení vibrací. Tato zařízení jsou napojena na centrální bezpečnostní dispečink, kde je signál okamžitě vyhodnocen a v případě potřeby vyslána hlídka k prověření incidentu.

Nedílnou součástí perimetrické ochrany je kamerový systém (CCTV). Letiště Ostrava využívá systém stacionárních kamer se stálým přenosem obrazu na bezpečnostní stanoviště. Kamery jsou umístěny v blízkosti kritických vstupních bodů, podél oplocení a na místech se ztíženou viditelností. Pro zvýšení bezpečnosti byl na letišti instalován nový systém AdvanceGuard, který slouží k ochraně perimetru letiště. Tento systém nahradil stávající zastaralý systém, který nebyl pro současné požadavky dostačující. Perimetr daného letiště se rozkládá na 12 km. Předcházející ochrana zahrnovala kombinaci motorizovaných hlídek a CCTV kamer. Tyto metody byly však nedostatečné a zastaralé, proto bylo potřeba modernizovat bezpečnostní systémy perimetru. Na rozdíl od alternativních radarových řešení, které spoléhají na jediný radar, poskytl systém AdvanceGuard efektivní pokrytí celého areálu, a to i přes jeho nepravidelný tvar. Jeden základní radar by vytvořil několik tzv. mrtvých zón, kde by kvůli nerovnostem terénu, nelineárnímu oplocení a infrastruktuře nedošlo k detekci. Společnost Navtech vlastní systém AdvanceGuard navrhla letišti použití čtyř kompaktních radarů, aby byla zajištěna nejvyšší možná úroveň pokrytí. Díky detekci a sledování narušitelů v reálném čase mohou bezpečnostní hlídky rychle zasáhnout a minimalizovat narušení provozu letiště.

Pravidelné fyzické kontroly perimetru jsou zajišťovány bezpečnostními složkami letiště. Tyto hlídky se provádějí v předem definovaných intervalech a dokumentují se v provozní evidenci. Součástí obchůzek je kontrola celistvosti oplocení, technického stavu zábran, funkčnosti vstupních bran a ověření přítomnosti případných cizích předmětů nebo známek narušení.

Kromě preventivní funkce má ochrana perimetru i reakční funkci – v případě pokusu o průnik je klíčová rychlost zásahu bezpečnostních složek. Z tohoto důvodu jsou vybrané části perimetru vybaveny rychlouzavíratelnými branami a přímou komunikací s dispečinkem, který může koordinovat pohyb zasahujících jednotek. Letiště rovněž disponuje mobilními bezpečnostními jednotkami, které v případě ohrožení vyjíždějí na konkrétní místo s podezřením na incident.

Letiště Ostrava podniklo modernizaci systému ochrany perimetru, například rozšířením o perimetrické radary, které umožňují detekci pohybu na větší vzdálenosti a v náročných povětrnostních podmínkách. Tyto radary jsou schopny identifikovat přítomnost osob, zvířat či vozidel a analyzovat typ hrozby pomocí definovaných algoritmů. V kombinaci s kamerovým systémem a systémem řízení incidentů mohou výrazně zvýšit detekční schopnosti celého letištního systému.

Ochrana perimetru je tedy komplexním souborem opatření, který zahrnuje fyzické, technické a organizační složky. Vzhledem k neustále se vyvíjejícím bezpečnostním hrozbám je nutné

systém pravidelně testovat, revidovat a adaptovat na nové podmínky. Letiště Leoše Janáčka v Ostravě v tomto směru podniká konkrétní kroky k udržení odpovídající úrovně bezpečnosti s důrazem na spolehlivost, rychlou reakci a prevenci.

5. Závěr

Článek se zabývá problematikou systému kontroly vstupu osob a vjezdu vozidel na Letišti Leoše Janáčka v Ostravě, přičemž cílem bylo posoudit aktuální stav tohoto systému a na základě analýzy navrhnout možná zlepšení. Výzkum vycházel z praktických zkušeností autora z bezpečnostního prostředí letiště, z pozorování přímo v terénu, z vedených rozhovorů se zaměstnanci útvaru bezpečnosti a z veřejně dostupných dokumentů letiště i platné legislativy.

Zjištěné informace ukazují, že současný systém odpovídá požadavkům platných právních předpisů a v řadě aspektů je funkční a provozně přiměřený. Nicméně byly odhaleny určité provozní nedostatky a potenciálně riziková místa, která mohou ovlivnit celkovou úroveň bezpečnosti. Konkrétně se jedná o oblasti týkající se organizace režimových opatření, automatizace kontrolních procesů a modernizace vstupních bodů, zejména pro vstup cestujících do CPSRA.

Na základě osobního šetření a vyhodnocení praxe byly navrženy konkrétní návrhy zlepšení, včetně možnosti zavedení automatického systému pro kontrolu palubních vstupenek, který by zvýšil propustnost, omezil riziko lidské chyby a snížil pracovní zátěž zaměstnanců. Tento krok je rovněž v souladu s výhledem na nárůst počtu cestujících, který v posledních letech přesáhl hranici 400 000 osob ročně.

Práce současně upozorňuje na důležitost systematické modernizace bezpečnostní infrastruktury, zvláště v oblasti vstupu osob jiných než cestujících a vjezdu vozidel do kritických částí letiště. Přestože konkrétní postupy v těchto oblastech podléhají neveřejnému režimu, byla provedena analýza na základě zkušeností a výstupů z rozhovorů, přičemž výsledná doporučení jsou zpracována v souladu s legislativními i provozními požadavky.

Závěrem lze konstatovat, že Letiště Leoše Janáčka v Ostravě má v oblasti fyzické bezpečnosti funkční systém, který však vyžaduje průběžné hodnocení, revizi a přizpůsobení novým podmínkám, a to nejen z hlediska provozu, ale i bezpečnostních výzev a technologického vývoje. Tento článek tak přináší ucelený přehled o stávajícím stavu a především slouží jako východisko pro budoucí opatření vedoucí k ještě vyšší míře zabezpečení a provozní efektivity.

Referencie

ŠÍMOVÁ, Adéla, Bc. : Systém kontroly vstupu osob a vjezdu vozidel na Letišti Leoše Janáčka v Ostravě a posouzení možnosti jeho zlepšení [Diplomová práce]. Žilinská univerzita v Žiline. Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov; Katedra leteckej dopravy. Vedúci diplomovej práce: LYSINA, Karol, Ing. ; Stupeň odbornej kvalifikácie: Inžinier. Žilina: FPEDAS, ŽU, 2025. 77 s.



IDENTIFIKÁCIA PREKÁŽOK V OKOLÍ LETISKA LZZI PROSTREDNÍCTVOM LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVANIA

Denis Švancár
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Filip Škultéty
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The article focuses on the identification of obstacles in the vicinity of Žilina Airport (LZZI) by means of airborne laser scanning technology. The main objective of the thesis is to identify the limitations of this technology in determining the location and height of potential obstacles in the vicinity of Žilina Airport that could threaten the safety of air traffic. The subsequent values found were compared with the requirements set by the International Civil Aviation Organization (ICAO). The results showed that the LiDAR technology enables satisfactory identification of obstacles interfering with the airport obstacle planes. A number of vegetation obstacles were identified that interfere with the obstacle planes of Žilina Airport. The accuracy of the data collection met the requirements set by ICAO PANS-AIM for the areas surrounding the airport. The work confirmed the time efficiency of airborne laser scanning when used over vegetation obstructions in the wider vicinity of the airport.

Keywords

Airborne Laser Scanning. LiDAR. Obstacle Clearance Surface. Tachymetry. LZZI

1. Úvod

V civilnom letectve je kladený najvyšší dôraz na bezpečnosť. Pre jej zabezpečenie je nevyhnutné byť informovaný o prekážkach, ktoré by mohli ovplyvniť bezpečnosť cestujúci, posádky a ľudí v okolí letísk. Preto je potrebné dôkladne monitorovať a eliminovať prekážky, ktoré by mohli ovplyvniť letovú prevádzku. Tradičné spôsoby zameriavania prekážok akými sú tachymetria a vizuálne pozorovania sú v súčasnosti nahradzované technológiami diaľkového prieskumu zeme.

Letecké laserové skenovanie je jednou z metód diaľkového prieskumu zeme. Umožňuje vytváranie digitálnych modelov povrchu zeme na základe interpolácie mračna bodov získaných pomocou LiDAR technológie. Tá na základe vysielania a príjmu odrazov infračerveného lasera dokáže získať presnú vizualizáciu mračna bodov vďaka, ktorý následne vie identifikovať objekty a prekážky ležiace na povrchu zeme.

Vzhľadom na vzrastajúcu leteckú prevádzku a potrebu rýchlo a presne určiť prekážky, ktoré by ju mohli ohroziť začala Medzinárodná organizácia pre civilné letectvo (ICAO) implementovať do svojich štandardov požiadavky, ktoré musia byť splnené aby bolo možné dáta získané pomocou leteckého laserového skenovania považovať za relevantné.

V diplomovej práci sa zameriavame na identifikáciu prekážok v okolí Letiska Žilina (LZZI) s využitím leteckého laserového skenovania. Cieľom práce je analyzovať možnosti technológie LiDAR pri zisťovaní polohy a výšky potenciálnych prekážok, ktoré by mohli zasahovať do prekážkových rovín Letiska Žilina, následne porovnanie s požiadavkami kladenými Medzinárodnou organizáciou pre civilné letectvo a výsledné zhodnotenie prekážok, ktoré by mohli ohroziť bezpečnosť letovej prevádzky na Letisku Žilina.

2. Metodika a metódy skúmania

V praktickej časti diplomovej práce je rozpracovaná metodológia určovania prekážkových rovín, zber dát a identifikovanie aktuálnych prekážok v okolí letiska Žilina LZZI prostredníctvom leteckého laserového skenovania (LLS). Pre vytýčenie prekážkových rovín je nevyhnutné postupovať v súlade s platnými normami stanovenými Medzinárodnou organizáciou pre letectvo ICAO, konkrétne s dokumentom Annex 14 a ICAO PANS – AIM. Pre slovenskú časť predpisov budeme využívať letecké predpisy L 14 a L 15, vydávané Doprávnym úradom.

Letisko Žilina, ktoré je klasifikované podľa kódu dráhy a kritického typu ako 2B (vzletová a pristávacia dráha s dĺžkou 800 m – 1200 m, max. rozpätie 15 m až 24 m a rozchod podvozku 4,5 až 6 metrov) podlieha presne zadefinovaným prekážkovým rovinám, ktoré je potrebné analyzovať z hľadiska existujúcich objektov, nových objektov a okolitého terénu. Záber snímanej oblasti preto zahŕňa nielen bezprostredne okolie pristávacej a vzletovej dráhy a pohybových plôch letiska ale aj širšie okolie letiska, kde môžu prekážky ovplyvniť bezpečnosť letovej prevádzky.

V rámci ďalšieho spracovávaní sa bude metodológia zaoberať zberom údajov pomocou bezpilotného leteckého systému (UAV – ang. Unmanned Aerial Vehicle) DJI Matrice 300 RTK vybaveného LiDAR systémom DJI Zenmuse L1, ktorý umožňuje získavať mračná bodov s vysokou presnosťou a hustotou. Pre získanie presnej polohy bude sústava dronu doplnená aj o polohový signál z DJI D-RTK mobilnej stanice, ktorá na základe presnej polohy prispeje k presnému určeniu polohy jednotlivých bodov pri leteckom laserovom skenovaní.

Výsledkom tejto akvizície bude implementovať vhodné metódy postprocesingu údajov, vrátane georeferencovania, filtrovania chybných odrazov, klasifikácie dát a transformácia mračna

bodov do digitálneho modelu terénu a digitálneho modelu povrchu.

Cieľom práce je demonštrovať presnosť metódy zberu dát prostredníctvom bezpilotných prostriedkov a technológie LiDAR, ktoré by mohli efektívne nahradiť alebo doplniť tradičné metódy pri tvorbe topografických a bezpečnostných analýz letiskovej infraštruktúry.

Prínos práce zahŕňa vytvorenie záznamu prekážok nachádzajúcich sa v prekážkových rovinách letiska Žilina a možné odporúčania pre ich odstránenie.

2.1. Stanovenie prekážkových rovin

2.1.1. Východiskové dokumenty a legislatívny rámec

Pri určovaní prekážkových rovin boli ako metodický základ aplikované ustanovenia ICAO Annex 14 – Letiská, zväzok I - Návrh a prevádzka letísk, konkrétne kapitol, týkajúcich sa prekážkových rovin. Dopĺňujúcimi predpismi boli ICAO Doc 9137 (Airport Service Manual), Letecká informačná príručka SR (AIP SR) ICAO Doc 8697 (Aeronautical Chart Manual) a ICAO Doc 8168 (Aircraft Operations). [1,2,3,4,5]

Vzťažný bod letiska

Vzťažný bod letiska je stanovený v geometrickom strede vzletovej a pristávacej 06/24 so zemepisnými súradnicami:

v systéme S-JTSK:

$$x = 1170303,46 \text{ m}$$

$$y = 452306,62 \text{ m}$$

v systéme WGS-84

$$\phi = 49^{\circ}14'00,4''\text{N}$$

$$\lambda = 18^{\circ}36'48,9''\text{E}$$

Nadmorská výška vzťažného bodu letiska je 310 m. n. m. Bpv. („Baltský po vyrovnaní“).

Pás dráhy

Rozmery pásu dráhy pre Letisko Žilina sú stanovené na základe jeho kódového čísla 2 a prístrojového priblíženia kategórie I. Dĺžka pásu dráhy siaha 60 metrov za dráhu a jeho šírka je 75 metrov od osi dráhy. Objekty, ktoré nevyhovujú požiadavkám ICAO Annex 14 by nemali byť vo vzdialenosti 45 metrov od osi dráhy

2.1.2. Definovanie prekážkových rovin pre priblíženie na pristátie

Pre Letisko Žilina bolo na základe klasifikácie dráhy a kritického typu lietadla definované kódové značenie 2C. Kódové číslo 2 určuje menovitú dĺžku dráhy vzletu od 800m až do 1200m, nie vrátane. Dráha Letiska Žilina 06/24 má dĺžku 1150 m. Kódový znak C je určený na základe rozpätia krídel kritického typu lietadla od 24m do 36m nie vrátane a taktiež podľa vonkajšieho rozchodu kolies hlavného podvozku od 6m do 9m, nie vrátane.

Pre Letisko Žilina je kritický typ lietadla ATR 42, s rozpätím 24,57 m a rozchodom podvozku 4,1 m.

Počas prevádzkových hodín Letisko Žilina disponuje prístrojom na presné priblíženie ILS CAT I, potrebné postupovať podľa požiadaviek pre stanovovanie prekážkových rovin podľa ICAO Annex 14. Letiská, ktoré disponujú prístrojom pre presné priblíženie, a je využívaný, musia mať stanovené nasledujúce prekážkové roviny:

- Vnútoraná vodorovná rovina
- Kužeľová plocha
- Vonkajšia vodorovná rovina
- Približovacia rovina
- Prechodová rovina
- Vnútoraná približovacia rovina
- Vnútoraná prechodová plocha
- Rovina nevydareného pristátia.

Pokiaľ Letisko Žilina nie je v prevádzke alebo zariadenie na presné priblíženie nie je aktívne (údržba). Musia byť pre Letisko Žilina stanovené prekážkové roviny pre nepresné priblíženie a pre neprístrojové priblíženie. Tieto roviny musia obsahovať:

- Vnútoranú vodorovnú rovinu
- Kužeľovú plochu
- Vonkajšia vodorovná rovina
- Približovaciu rovinu
- Prechodovú plochu

V rámci tejto diplomovej práce sa zameriavame výlučne na stanovenie prekážkových rovin pre dráhu (06/24) vybavenú prístrojom pre presné priblíženie a pristátie. Nakoľko tieto roviny podliehajú prísnejším požiadavkám na ochranu letovej prevádzky v porovnaní s rovinami pre nepresné priblíženie alebo neprístrojové priblíženie, ktoré sú z veľkej časti týmto typom rovin už pokryté.

Vnútoraná vodorovná rovina

Nachádza sa vo výške 45 metrov nad vzťažným bodom letiska. Jej okraj je pre Letisko Žilina meraný taktiež od referenčného bodu a siaha do vzdialenosti 3500 m v horizontálnej rovine.

Kužeľová plocha

Jej základňa začína vo výške vnútornej horizontálnej roviny (45 m). Od nej siaha do výšky 105 m nad referenčným bodom letiska (výška plochy 60 m). Jej sklon je 5% voči horizontálnej osi.

Vonkajšia vodorovná rovina

Rozprestiera sa horizontálne od výšky 105 m (koniec kužeľovej plochy) do vzdialenosti 10 000 m od koncov dráh.

Približovacia rovina

Približovacia sa skladá z dvoch častí. Začína 60 metrov za prahom dráhy a šírka vnútorného okraja je 150 metrov (75 metrov do obidvoch strán od osy RWY). Od jej okrajov sa roztvára 15 % do každej strany.

- Prvá časť má dĺžku 3000 m so sklonom 2,5 %
- Druhá časť má dĺžku 12 000 m so sklonom 3 %.
- Jej celková dĺžka je 15 000 m

Prechodová rovina

Tvorí priestor medzi približovacou rovinou a rovinou nevydareného pristátia. Pod sklonom 14,3 % kopíruje horizontálnu rovinu pasu dráhy.

Vnútorná približovacia rovina

Vnútorná približovacia rovina slúži lietadlám pre zabezpečenie dostatočného rozstup voči okolitému terénu pri presnom priblížení na pristátie. Jej začiatok je 60 m pred prahom dráhy so šírkou 90 m, dĺžkou 900 m a sklonom 2,5 %.

Vnútorná prechodová rovina

Vnútorná prechodová rovina siaha od pásu dráhy so sklonom 40 % voči horizontálnej rovine pasu dráhy.

Rovina nevydareného pristátia

Rovina nevydareného pristátia siaha od konca pasu dráhy. Šírka roviny je 90 m pri pase dráhy, roztvára sa 10 % na každú stranu so sklonom 4 %. Rovina končí pri dosiahnutí vnútornej vodorovnej plochy (45 m nad referenčným bodom letiska).

Definovanie prekážkových rovín pre vzlet

Pre vzlet ICAO Annex 14 definuje len jednu prekážkovú rovinu. Pre Letisko Žilina s kódovým číslom 2 je potrebné aby vnútorný okraj predpolia začínal vo vzdialenosti 60 metrov od prahu dráhy a mal šírku 80 metrov. Následne so sklonom 4 % sa roztvára na každú stranu 10 % až do maximálnej šírky 580 metrov a vzdialenosti 2500 metrov.

Historicky zaznamenané prekážky zasahujúce do Ochranných pásiem

Letisko Žilina periodicky podľa zákona vykonáva aktualizáciu prekážok ktoré by mohli ohroziť bezpečnú prevádzku lietadiel a zasahovať či už do prekážkových rovín ale aj ochranných pásiem letiska. Posledné meranie sa uskutočnilo 21. septembra 2022 za účasti odborného pracovníka z oblasti OPÚ (Ochrana prevádzky a údržby) a zástupcov spoločnosti SYKO s.r.o., ktorý vykonávali merania objektov pre Letiskovú spoločnosť Žilina a.s.. [31]

Počas prehliadky ochranných zón Letiska Žilina boli identifikované zmeny oproti predošlým revíziám z rokov 2012 a 2014, konkrétne odstránenie prekážky č. 7 (Komín Pivovaru Popper) a doplnenie nových prekážok – technické zariadenia v areáli letiska (vysielače). Súčasne bolo vykonané aj premeranie vegetačných prekážok (č.23 – 26), pričom bola zaznamenaná mierna zmena výškového rozdielu a údaje zo starších meraní boli nahradené novými. [6]

Zber dát bol realizovaný kombináciou meracích metód a to pomocou GNSS-RTK a klasickej tachymetrie prístrojom Leica TS15A. Pre doplnkové merania bol využitý prístroj Leica Disto D8. Po meraní boli dáta spracované v súradnicovom systéme ETRS89 a následne transformované do systému S-JTSK použitím transformačného modelu Molodensky – Badekas na základe lokálneho transformačného kľúča vytvoreného z bodov štátnej priestorovej siete. [6]

Výpočet nadmorských výšok Bpv. bol realizovaný interpoláciou prevýšenia geoidu z digitálneho výškového modelu DMVR05. Následne boli dáta spracované a vyhotovené záverečné správy. Merania zodpovedali kritériám presnosti podľa STN v rámci III. triedy a potvrdili, že žiadna zo známych prekážok nepresahuje limitné výšky určené pre ochranné roviny letiska. Podrobný zoznam zameraných prekážok nájdete v prílohe A. [6]

2.2. Metodika skenovania letiska pomocou technológie ALS

Na základe poznatkov získaných z predchádzajúcich kapitol sa táto časť diplomovej práce zameriava na metodiku zberu údajov získaných prostredníctvom leteckého laserového skenovania. Cieľom tejto kapitoly je vytvoriť presný a systematický postup, ktorým boli dáta zhromaždené a následne vykonané pozemné geodetické merania, ktoré by overovali a zaručovali presnosť získaných dát pomocou technológie LiDAR. Metodický prístup v tejto kapitole definuje jednotlivé fázy od plánovania letu až po samotný zber kontrolných údajov.

2.2.1. Stanovenie miesta záujmu skenovania

Pre účely práce a jej rozsahu boli stanovené miesta záujmu vegetačné prekážky v okolí Letiska Žilina, ktoré v období od posledného merania zmenili svoju výšku a teda by mohli ovplyvniť bezpečnosť leteckej prevádzky. Taktiež sa zameriavame na stavebné prekážky v areáli letiska, ktorými sú budovy Žilinskej univerzity - Leteckého výcvikového a vzdelávacieho centra. Ostatné prekážky ostávajú nezmenené a teda svojou výškou by nemali zasahovať do prekážkových rovín Letiska Žilina.

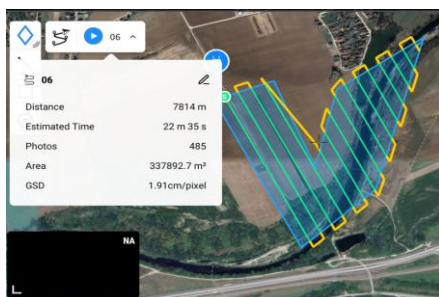
Vegetačné prekážky v podobe vetrolamov majú v okolí Letiska Žilina viaceré funkčné účely. Ich hlavnou úlohou je znižovanie účinkov vetra na otvorené plochy letiskovej infraštruktúry akými je hlavne vzletová a pristávacia dráha. Vetrolamy dokážu zmierniť rýchlosť a prúdenie vetra počas kritických fáz letu, akými sú rotácia pri vzlete a podrovanie pri pristátí. Ich nevýhodou je vytváranie turbulentného prúdenia pri vzlete a finálnom priblížení, ktoré môže taktiež ovplyvniť kritické fázy letu. Vetrolamy zároveň plnia protihlukovú funkciu pre okolité obce obkolesujúce Letisko Žilina.

V ovládači od DJI Matrice 300 RTK sme si v aplikácii DJI Pilot 2 nastavili požadované územie, ktoré chceme skenovať. Na základe zvolenej výšky letu, rýchlosti a počtu skenovaných bodov na meter štvorcový nám aplikácia zobrazila vypočítanú trasu. Táto trasa sa dá horizontálne upravovať tak aby sme si ju prispôbili skenovanej oblasti. My sme si trať letu pootočili tak aby boli presne naskenované prekážky, ktoré by mohli zasahovať do prekážkových rovín letiska a zároveň doba letu bola čo najnižšia aby sme šetrne pristupovali k ekonomickému využívaniu bezpilotného prostriedku a jeho batérií.

Územie sme si rozdelili na 3 oblasti. Vetrolamy pred dráhou 06, vetrolamy pred dráhou 24 a univerzitné budovy. Zvyšné územie bolo doplnené údajmi z dopravného úradu, ktoré boli získané pomocou leteckého laserového skenovania v rokoch 2017 za účelom vytvorenia digitálneho modelu povrchu Slovenskej republiky (DMP 5.0)



Obrázok 1 Vetrolamy pred dráhou 24



Obrázok 2 Vetrolamy pred dráhou 06

2.2.2. Vyznačenie vlícovacích bodov

Vlícovacie body sme vytvorili pomocou čiernych a bielych výkresov. Tieto voči okolitej flóre tvoria výraznú kontrastnú plochu na základe ktorej je možné určiť ich polohu. DJI Zenmuse L1 disponuje aj RGB kamerou a pri skenovaní vytvára aj fotografie územia. Vďaka tomu by mali byť vlícovacie body jednoducho rozpoznateľné nielen na základe odrazivosti ale aj farby pri vyhodnocovaní získaných bodov pomocou LiDAR technológie.

Vlícovacie body sme následne umiestnili do 3 lokácií, ktoré sme následne skenovali za pomoci leteckého laserového skenovania a LiDAR technológie. Na každú lokáciu boli použité 2 body aby ich presná poloha mohla byť v softwarovom modeli určená.

Za pomoci geodeta a zariadenia Leica Viva GS12 bola určená presná poloha stredov vlícovacích bodov. Presnosť statického merania stanice je v rámci 3 mm horizontálne a 6 mm vertikálne. [35] Následne boli okraje vlícovacích bodov označené pre použitie v deň, kedy bude vykonávané letecké laserové skenovanie (kvôli nepriaznivému počasiu neboli zameranie vlícovacích bodov a letecké laserové skenovanie vykonávané v jeden deň).



Obrázok 3 Zameranie polohy a označenie vlícovacieho bodu

Zariadenie Leica Viva GS12 používa súradnicový systém S-JTSK 03. Poloha vlícovacích bodov bola následne extrahovaná zo zariadenia a transformovaná na údaje vo ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989). Nadmorská výška vlícovacích bodov bola zameraná v Bpv výškovom systéme a následne transformovaná do ETRS89.

2.3. Zber kontrolných údajov pomocou Tachymetrie

Pre vykonanie tachymetrického merania sme využívali prístroje Leica Viva GS12 a Leica TS15 I. Zameranie vegetačných prekážok bola vykonaná certifikovaným geodetom podľa postupov uvedených pre geodetické merania aby sme dosiahli čo najvyššiu presnosť meraní.

2.3.1. Príprava merania

Pred samotným meraním bolo potrebné vybrať vhodné stanovisko, ktoré by poskytovalo dostatočný výhľad na vegetačné prekážky. Na stanovisku bol inštalovaný statív, na ktorom bola umiestnená totálna stanica. Nohy statívu boli umiestnené tak aby vodováha umiestnená na ňom bola v horizonte a guľička ukazovala stred.

Pre kalibráciu prístroja bolo nutné zamerať minimálne 2 body aby sa mohla totálna stanica Leica TS15 I ustáliť v zemepisných súradniciach. My sme zvolili metódu troch bodov, čím vzniká presnejšie meranie. S prístrojom Leica Viva

GS12 sme zamerali 3 body na základe GNSS merania. Následne boli tieto body manuálne vložené do totálnej stanice. [7]



Obrázok 4 Zameranie bodov pre kalibráciu totálnej stanice

Kalibrácia totálnej stanice spočívala v opakovanom zameraní bodov pomocou kryštálu, ktoré vytvorilo presnú zemepisnú polohu totálnej stanice s presnosťou na milimetre. Postupne boli totálnou stanicou zamerané jednotlivé body meracou tyčou s kryštálom.



Obrázok 5 Kalibrácia totálnej stanice

2.3.2. Zameranie prekážok

Po ustálení totálnej stanice v súradnicovom systéme bolo možné pristúpiť k samotnému meraniu vybraných vegetačných objektov.



Obrázok 6 Zameranie vrcholov korún stromov

Pri meraní vegetačných prekážok bolo kritickým faktorom počasie, ktoré ovplyvňovalo ich pohyb. Nakoniec však meranie bolo úspešné a pomocou totálnej stanice, ktorá zameriavala prekážky odrazom laserového lúča bola zistená presná zemepisná poloha a nadmorská výška prekážok.

Presnosť merania totálnej stanice je 1mm. Výsledné hodnoty namerané pomocou totálnej stanice a transformované do požadovaného súradnicového systému s ktorým bude naše softwarové zariadenie pracovať. Hodnoty sú uvedené v nasledujúcej tabuľke č. 6

Pre určenie polohy prekážok v prípade budov Žilinskej univerzity – leteckého výcvikového a vzdelávacieho centra sme využili správu o prekážkach zasahujúcich do ochranných zón Letiska Žilina, vytvorenú spoločnosťou SYKO s.r.o. pre Letiskovú spoločnosť Žilina a.s. Zo správy boli vytiahnuté body, na základe ktorých by sme vedeli určiť presnú polohu pri ustálení mračna bodov do softvéru pre jeho spracovanie.

3. Výsledky práce

3.1. Prekážky

Po zakreslení jednotlivých prekážkových rovín Letiska Žilina a následnom odčítaní údajov z Quick Terrain Modelera, bolo možné vykonať podrobnú analýzu výšky, polohy a charakteru prekážok, ktoré zasahujú do prekážkových rovín Letiska Žilina. Na základe tejto analýzy môžeme jednoznačne konštatovať zistené nálezy týkajúce sa objektov, ktoré presahujú stanovené

výškové limity prekážkových rovín a potenciálne predstavujú riziko pre bezpečnosť leteckej prevádzky.

Do prvej časti približovacej roviny a jej prechodovej plochy zasahuje viac než 30 vegetačných prekážok. Tieto prekážky nezasahujú do vnútornej približovacej roviny. Po vykreslení vnútornej približovacej roviny a prepočtu presnej výšky a vzdialenosti bodu 4 bolo zistené, že bod zatiaľ nezasahuje do vnútornej zostupovej roviny. Taktiež bod 3 zatiaľ nezasahuje do približovacej roviny. Tieto dve prekážky boli do tabuľky prekážiek zasahujúcich do rovín pridané hlavne z dôvodu presného zamerania geodetom a ich blízkeho výskytu pod prekážkovou rovinou. Taktiež tieto prekážky tvoria stromoradie vetrolamov, ktoré počas prichádzajúceho vegetačného obdobia môžu výrazne zvýšiť svoju výšku a tým zasahovať do najkritickejšej roviny pri priblížení lietadla na pristátie.

Program Quick Terrain Modeler nedokázal presne vykresliť uhol roviny pre priblíženie, preto bol použitý len ako pomôcka pri identifikovaní prekážok a nie pre odčítanie priamych hodnôt presahov prekážok cez roviny. Presahy boli vypočítané na základe trigonometrie, v ktorej bola použitá vzdialenosť od pásu dráhy, výška prekážky a uhol zvierajúcej roviny. Pri výpočte nebolo použité zakrivenie geoidu a preto sa výpočty môžu mierne líšiť (rádovo v cm).

Budovy Žilinskej univerzity a jej hangáre sú v dostatočnej vzdialenosti od prekážkových rovín a svojou časťou nezasahujú do prechodovej roviny. Veža letiska je jedinou nami zaznamenanou prekážkou, ktorá do roviny zasahuje. Táto prekážka vytvára svojou prítomnosťou len malé riziko. Je využívaná počas prevádzkových hodín na riadenie príletov, odletov a pohybov na pohybových plochách letiska, vďaka tomu má opodstatnenie sa nachádzať v blízkosti dráhy a zasahovať do prekážkových rovín Letiska Žilina.

Vetrolamy nachádzajúce sa za vzletovou a pristávacou dráhou 06 svojou výškou presahujú limitované hodnoty stanovené pre prekážkové roviny Letiska Žilina, konkrétne v oblasti roviny nevydareného pristátia. Pri identifikácii polohového a výškového umiestnenia týchto vetrolamov bolo zistené, že pri štyroch vegetačných prekážkach dochádza k prieniku do prekážkovej roviny, čím vzniká potenciálne riziko pre bezpečnosť leteckej prevádzky v prípade vzletu z dráhy 06 alebo nevydareného pristátia lietadla na dráhu 06.

3.2. Presnosť meraní

Chyby merania sa s každým krokom pri overovaní a zakresľovaní do požadovanej formy kumulujú. Tieto chyby sú nazývané aj kumulatívne. Pri každom meraní je vytváraná smerodajná odchýlka σ_n , ktorá sa sčíta a následne vznikne celková chyba $\sigma_{celk.}$

$$\sigma_{celk.} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2}$$

Meranie pomocou Tachymetrie vytvára minimálne chyby hlavne vďaka presnému meraniu a málo krokovému postupu pre vyjadrenie dát.

$$\sigma_{celk.} = \sqrt{\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{Tot.stanica}^2}$$

σ_{GNSS} - chyba určenia súradníc pri výšky a polohy pri GNSS je 3 mm

$\sigma_{Tot.stanica}$ – chyba totálnej stanice pri meraní vzdialenosti a uhla je pri 1 km do 1 mm.

Kumulovaná chyba vzniknutá pri tachometri je 3,2 mm. Ako bolo spomenuté vyššie pri vykonávaní geodetického merania bol kritickým faktorom vietor a počasie, ktoré vytváralo pri zameriavaní stromov pohyblivú prekážku. Kvôli tomu je možné konštatovať, že odchýlka od merania môže byť o niečo vyššia pri vegetačných prekážkach než pri budovách so stabilným základom.

Pri meraniach pomocou LiDAR bolo úkonov, ktoré postupne vytvárali kumulatívnu chybu.

$$\sigma_{celk.} = \sqrt{\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{Poloha}^2 + \sigma_{Sken.}^2 + \sigma_{Vlíc.}^2}$$

σ_{GNSS} – Zameranie vlíčovacích bodov pomocou GNSS zariadenia 3 mm

$\sigma_{Poloha.}$ – Limitné hodnoty presnej polohy a výšky v rámci zariadenia DJI Zenmuse L1. Výšková presnosť 5 cm, polohová presnosť 10 cm

$\sigma_{Sken.}$ – Skenovanie vegetácie do 10 cm od reálnej hodnoty. Hodnota sa dá znížiť zvýšením počtu skenovaných bodov na m² – vytvorenie hustejšej rastrovej siete

$\sigma_{Vlíc.}$ – Chyba pri upravovaní polohy bodu v modeli do 10 cm. Táto chyba sa dá minimalizovať zmenením postupu snímkovania a to umiestnením D-RTK na vlíčovací bod, kedy následne nie je problém určiť presné súradnice od meraného bodu do 1 cm vertikálne, do 2 cm horizontálne.

$\sigma_{geoid.}$ – priemerné zakrivenie geoidu na Letisku Žilina je do 5 cm na 1 km [30]

Výsledná chyby nášho merania je do 15 cm vo vertikálnom smere a do 20 cm v horizontálnom.

3.3. Zhrnutie

Podľa ICAO PANS – AIM by sme splnili požiadavky pre skenovanie priestoru 2 (priestor prekážkových rovín) a tými sú vertikálna presnosť do 3 metrov s rozlíšením na jedno desatinné číslo a horizontálnou presnosť do 5 metrov.

Požiadavky pre priestor 3 by sme nespĺnili hlavne z dôvodu požadovaného rozlíšenia na 1 centimeter. Také rozlíšenie by nebolo dosiahnuteľné s našim typom zariadenia DJI Zenmuse L1 a pri výkonnejších zariadeniach by časová náročnosť snímkovania a dátová náročnosť spracovania bodov boli neefektívne.

Z toho dôvodu odporúčame prekážky v priestore 3 zaznamenávať pomocou tachymetrie, kedy časová náročnosť pre merania niekoľko desiatok dát v teréne je do 2 hodín. Spracovanie údajov taktiež nezahrňuje rozsiahle programy a zariadenia pre výpočet výšky prekážok a ich zásahu do prekážkových rovín. Tachymetria zabezpečuje vysokú presnosť

a spoľahlivosť pri vytyčovaní jednotlivých fixných bodov, ktoré sa s časom nemenia.

Pokiaľ ide o prekážky vyskytujúce sa v priestoroch 2 a 4, je možné použiť letecké laserové skenovanie s požadovanou hustotou bodov. Prekážky akými sú napríklad aj vegetácia sa môžu s časom meniť a zasahovať do prekážkových rovín letiska. To predurčuje výhody technológie LiDAR, kedy vieme priebežne skenovať územie a porovnávať ho so staršími dátami. Následkom toho je možné vypracovať opatrenia pre odstránenie prekážok predtým ako by mohli zasahovať do prekážkových rovín.

3.4. Odporúčania

V prípade vegetačných prekážok zasahujúcich do prekážkových rovín letiska Žilina odporúčame uskutočniť len čiastočný výrez, ktorý by odstránil časti prekážok zasahujúcich do prekážkových rovín. Taktiež nové stromoradie, ktoré vyrástlo pred dráhou 06 je potrebné obmedziť v jeho ďalšom vertikálnom raste a tým zabrániť zasiahnutiu do prekážkových rovín Letiska Žilina.

Vegetačné prekážky v podobe vetrolamov zohrávajú významnú úlohu pre pilotov v rámci priblíženia a vzletu z dráh 06 a 24. Vietor predovšetkým počas letných mesiacov vytvára silné nárazové prúdenie, ktoré ovplyvňuje prevádzku na letisku a hlavne neskúsených študentov, ktorý toto letisko využívajú pre letecký výcvik, nadobudnutie skúseností a získanie licencie komerčného pilota. Preto neodporúčame úplné odstránenie prekážok, len uskutočnenie

4. Záver

Diplomová práca poskytuje komplexný prehľad o identifikácii prekážok v okolí Letiska Žilina. Teoretická časť podrobne rozpracováva problematiku v rámci legislatívneho rámca stanovenia a zadefinovania prekážkových rovín na medzinárodnej úrovni. Ďalej pojednáva o problematike jednotlivých priestorov v okolí letiska, ktoré si vyžadujú samostatný prístup pri zbere dát pomocou leteckého laserového skenovania a ich následné spracovanie.

V praktickej časti bol realizovaný zber dát v okolí Letiska Žilina za pomoci bezpilotného prostriedku so zariadením LiDAR. Dopĺňujúce geodetické merania mali zabezpečiť správne vloženie modelu do programového rozhrania a porovnať klasické metódy merania s novodobým vytváraním mračien bodom a ich následnou interpoláciou, do digitálnych modelov.

Výsledky praktickej časti ukázali, že pomocou leteckého laserového skenovania je možné efektívne určiť prekážky zasahujúce do prekážkových rovín Letiska Žilina, následne ich identifikovať a stanoviť ich kritickú výšku, v ktorej by bolo nutné ich udržiavať, aby neohrozovali bezpečnosť leteckej prevádzky.

Presnosť skenovania okolia letiska spĺňa štandardy stanovené medzinárodnou organizáciou pre civilné letectvo v priestoroch 1, 2 a 4 pričom bola dosiahnutá vertikálna presnosť metódy do 15 centimetrov a horizontálna do 20 centimetrov.

Pre budúcnosť prevádzky na Letisku Žilina by bolo vhodné rozšíriť oblasť skenovania na širšie územie, do ktorých zasahujú prekážkové roviny letiska a v pravidelných intervaloch zaznamenávať zmeny rastu vegetácie. To by následne prinášalo

komplexné informácie o raste a formácií vegetácie v okolí letiska a mohol sa následne vypracovať plán pre postupnú úpravu a výrub vegetácie v pred-vegetačnom období, kedy bol predpoklad pre zasahovanie do kritických častí letiska a jeho prekážkových plôch.

Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

- [1] MEDZINÁRODNÁ ORGANIZÁCIA PRE CIVILNÉ LETECTVO (ICAO). Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations. Volume II: Construction of Visual and Instrument Flight Procedures [online]. 6. vydanie. Montréal: ICAO, 2014. ISBN 978-92-9249-637-1. Dostupné na: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/5801.pdf> [cit. 28. 4. 2025].
- [2] MINISTERSTVO DOPRAVY, POŠT A TELEKOMUNIKÁCIÍ SLOVENSKEJ REPUBLIKY. L 14 Letiská. I. zväzok: Navrhovanie a prevádzka letísk. Bratislava: Letové prevádzkové služby Slovenskej republiky, štátny podnik, 2006. ISBN 80-969299-9-2.
- [3] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Airport Services Manual. Part 6: Control of Obstacles. 2nd edition. Montréal: ICAO, 1983
- [4] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Doc 8168 – Procedures for Air Navigation Services: Aircraft Operations. Volume I – Flight Procedures. Sixth Edition, 2018. Montréal: ICAO, 2018. Dostupné na: <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/11/ICAO-Doc-8168-Volume-I-Flight-Procedures.pdf>
- [5] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Annex 4 to the Convention on International Civil Aviation: Aeronautical Charts. Eleventh Edition, July 2009. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2009. Dostupné na: <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/09/ICAO-Annex-4-Aeronautical-Charts.pdf>
- [6] SÝKORA, František. Ochranné pásma letiska Žilina. Aktualizácia a revízia priestorových polôh potenciálnych prekážok ochranných pásiem Letiska Žilina – Dolný Hričov. Geodetická dokumentácia. Žilina: SYKO, s.r.o., 2022.
- [7] LEICA GEOSYSTEMS AG. Leica Viva TS15, Heerbrugg, Switzerland: Leica Geosystems AG, 2010. Dostupné na: <https://www.geotech.sk/downloads/Totalstation/TS11-15/VivaTS15-prospekt-SK.pdf>



ALTERNATÍVNE PROTIZRÁŽKOVÉ SYSTÉMY V CIVILNOM LETECTVE

Richard Tabernaus
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Branislav Kandra
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The article describes various alternative and traditional anti-collision avoidance systems in civil aviation. This article focuses on experimental measurements of the reliability of the PCAS system in the mountainous terrain around the city Žilina. Article also contains a technical description of the system and outlines the coverage of Slovak airspace by the secondary surveillance radar. Finally, the article evaluates the PCAS system and supports its implementation under specific conditions into the operation of LVVC during training flights to improve situational awareness and safety.

Keywords

Anti-collision avoidance systems, TCAS, PCAS, FLARM, NEURONE

1. Úvod

S nárastom objemu leteckej dopravy sa zvyšujú nároky na koordináciu a efektívnosť prevádzky a je nevyhnutné zabezpečiť spoľahlivé riešenie na minimalizovanie zrážok lietadiel, ktoré často končia fatálne. Z tohto dôvodu v 80tych rokoch minulého storočia sa začal rozvíjať ICAO štandard ACAS, definujúci protizrážkový systém založený na signáloch z odpovedača sekundárneho radaru, ktorý avšak je od pozemného vybavenia nezávislý a poskytuje pilotovi informácie o potencionálnych konfliktných lietadlách. V súčasnej dobe sa už využívajú rozličné protizrážkové systémy, medzi ktoré patria napríklad TCAS, FLARM alebo PCAS. [1]

Práve PCAS je cenovo dostupná alternatíva k systému TCAS, ktorý využívajú vo veľkom primárne dopravné lietadlá a predstavuje jednoduchú identifikáciu a návrhy na predchádzanie kolízií vo vzduchu. Systém PCAS môže byť veľkým prínosom v oblasti, kde pokrytie primárnym radarom je slabé zabezpečené. Navyše, z dôvodu jeho nízkych nákladov na prevádzku a vysokú mieru mobility je toto zariadenie atraktívne nielen pre všeobecné letectvo ale aj pre menšie spoločnosti vykonávajúce letecké práce alebo aj pre výcvikové organizácie. [2]

Hlavným cieľom článku je experimentálne overenie alternatívneho systému PCAS v rámci výcvikovej organizácie LVVC v Žiline v reálnych podmienkach na zemi aj vo vzduchu aby sa zistilo, ako systém dokáže identifikovať hrozby a predchádzať riziku, akú má spoľahlivosť, dosah, a či je prakticky využiteľný aj pri výcvikových letoch v geograficky náročnej oblasti kde pokrytie sekundárnym radarom môže byť problém, akým je práve kopcovitý terén v okolí Žiliny. Článok navyše obsahuje odporúčania pre implementáciu alebo prípadne zlepšenie systému na špecifickú potrebu leteckých škôl v podobných podmienkach.

2. Metodika a metódy skúmania

Táto kapitola článku sa venuje stanoveným primárnym a parciálnym cieľom článku a výskumným metódam, ktoré boli použité pri plnení daných cieľov.

Článok obsahuje nasledujúce primárne ciele:

- Zistiť spoľahlivosť systému PCAS v členitom teréne v okolí Žiliny v závislosti od jeho využitia pre výcvikové lety LVVC na zlepšenie situačného povedomia študentov a inštruktorov a bezpečnosti
- Navrhnuť prípadné využitie systému

Primárnymi zdrojmi informácií v článku boli internetové zdroje, odborné články, manuály, prednášky a vlastné zozbierané informácie.

Pri písaní článku bola využitá metóda pozorovania a porovnania. Prístroj PCAS bol umiestnený počas výcvikových letov na palubu lietadla Viper SD4 a počas činnosti letov boli získavané fotografie pri zmene indikácie prístroja. Indikované údaje prístrojom ako relatívna vzdialenosť, relatívna výška a relatívny smer hrozby boli porovnávané s údajmi na stránke FlightRadar24, kde pre presnosť bolo započítané aj 5 sekundové oneskorenie stránky. Relatívna vzdialenosť bola určovaná pomocou aplikácií EpicPen a ScreenRuler, ktoré na základe mierky vedeli zistiť reálnu vzdialenosť medzi dvoma bodmi.

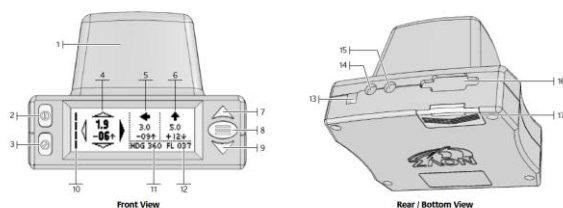
Na základe tohto porovnania bola štatisticky vyhodnotená spoľahlivosť systému a syntézou údajov určené potencionálne využitie takého pomocného prístroja pre zvýšenie bezpečnosti a situačného povedomia počas prevádzky lietadiel vykonávajúcich lety aj v členitom teréne v okolí Žiliny.

3. Výsledky

Táto časť článku sa venuje krátkemu opisu systému PCAS a výsledkom meraní.

3.1. Systém PCAS

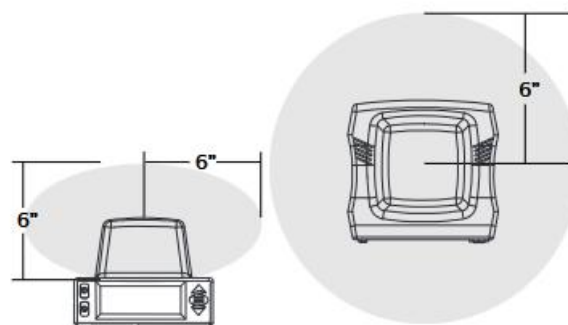
Obrázok 1 zobrazuje použitý typ prístroja PCAS. [2]



Obrázok 1 – Technický popis zariadenia PCAS [2]

1. Všesmerová anténa
2. Tlačidlo napájania
3. Tlačidlo na vypnutie zvukových výstrah
4. Displej na identifikáciu primárnej hrozby
5. Displej na identifikáciu sekundárnej hrozby
6. Displej na identifikáciu terciárnej hrozby
7. Tlačidlo „hore“
8. Tlačidlo „menu“
9. Tlačidlo „dole“
10. Indikácia hlasitosti prístroja
11. Kurz lietadla v ktorom sa prístroj nachádza
12. Letová hladina lietadla v ktorom sa prístroj nachádza
13. Napájanie
14. Audio out
15. Audio in
16. RS-232 konektor
17. Konfiguráčné spínače PCAS

Tento prístroj na správne fungovanie potrebuje byť umiestnený tak, že šesťpalcový priestor (15,24 cm) guľový vyznačený šedou farbou na obrázku 2 bude prázdny, z dôvodu zamedzenia rušenia antény. Zároveň kabeľáž napájania prístroja nesmie byť vyššie, ako je základňa antény systému. [2]

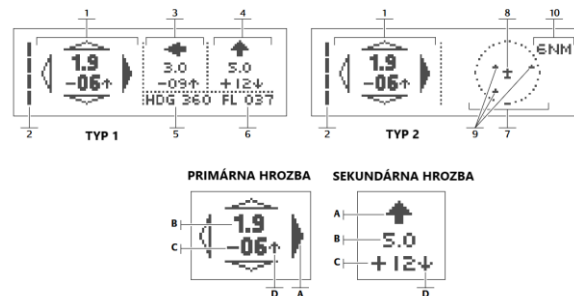


Obrázok 2 – Nutnosť voľného priestoru okolo všesmerovej antény systému PCAS [2]

Prístroj je napájaný adaptérom, ktorý je súčasťou balenia. Adaptér dokáže pracovať na 12 až 40 voltovej jednosmernej sieti a pripája sa priamo v kabíne lietadla. [2]

Dosah prístroja je maximálne 6 NM a výškovo $\pm 2\,500$ stôp. Prístroj má navyše pevný výškový limit stanovený na hladinu FL 220, kde nad túto hladinu prístroj už nebude indikovať žiadne lietadlá. Tento dosah je konfigurovateľný a dá sa znižovať, v závislosti od potrieb používateľa. [2]

Obrazovku prístroja je možné konfigurovať na dva rôzne typy, ktoré je možné vidieť na obrázku 3. Na obrázku je taktiež možné vidieť spôsob, akým PCAS indikuje hrozby. [2]



Obrázok 3 – Integrovaný displej prístroja PCAS [2]

Na obrázku 3 možno vidieť nasledovné parametre : [2]

1. Indikácia primárnej hrozby
2. Indikácia hlasitosti
3. Indikácia sekundárnej hrozby (iba typ 1)
4. Indikácia terciárnej hrozby (iba typ 1)
5. Indikácia kurzu (iba typ 1)
6. Indikácia výšky (iba typ 1)
7. Grafické znázornenie situácie
8. Lietadlo vybavené prístrojom PCAS
9. Ostatné zachytené lietadlá
10. Nastavený dosah prístroja

Jednotlivé hrozby prístroj zobrazuje nasledovne : [2]

1. Indikácia smeru
2. Indikácia vzdialenosti v NM
3. Indikácia relatívnej výšky
4. Indikácia stúpajúceho/klesajúceho trendu lietadla narušiteľa

Smer hrozby je indikovaný pomocou kompasovej ružice na displeji primárnej hrozby, prípadne šípkou v prípade sekundárnej hrozby. Dôležitými poznatkami je, že smer nie je závislý od svetových strán, ale je závislý od momentálneho kurzu. Šípka hore teda znázorňuje hrozbu pred lietadlom. V prípade primárnej hrozby môžu byť rozsvietené dva pri sebe umiestnené smery, čo indikuje polohu hrozby niekde medzi týmito kvadrantami. [2]

Primárne hrozby sú indikované nasledujúcim spôsobom. V prvom rade prístroj indikuje lietadlá s najnižšou vertikálnou separáciou. Následne prístroj vyhodnocuje vertikálny trend hrozby a v poslednom rade vertikálny trend lietadla vybaveného systémom PCAS. [2]

Relatívna výška je indikovaná v 100 stopových inkrementoch, a závisí od presnosti údajov z odpovedačov lietadiel. Relatívna vzdialenosť je vo vzdialenosti menšej ako 2 NM indikovaná v 0,1 NM inkrementoch, vo vzdialenosti 2-3 NM v 0,2 NM inkrementoch a vo vzdialenostiach 3-6 NM v celých námorných míľach. Relatívny smer je rozdelený na 90 stupňové kvadranty. [2]

3.2. Výsledky merania

Táto časť článku sa venuje zhrnutím výsledkov zo všetkých piatich experimentálnych meraní systému PCAS. Celkový čas merania bol 12 hodín a 40 minút. Merania boli rozvrhnuté do piatich výcvikových letov počas jesene 2024 a jari 2025. Až 66 krát vstúpili rôzne lietadlá do dosahu zariadenia PCAS a z toho 40 krát boli aspoň na niekoľko sekúnd správne indikované dvoma parametrami.

Tabuľka 1 znázorňuje rozdelenie zachytených a nezachytených lietadiel prístrojom. Počas letu v okruhovej výške 2 400 stôp a nižšie bolo zachytených iba 13 lietadiel z 29, čo predstavuje úspešnosť zachytenia 45 %. Na druhú stranu vo výškach vyšších ako 4 000 stôp úspešne prístroj zachytil až 85 % lietadiel. Nad výškou 4 200 to predstavuje už 90 % úspešne zachytených lietadiel.

Tabuľka 1 – Počet zachytených a nezachytených lietadiel prístrojom [Zdroj: Autor]

Parametre	Zachytené lietadlá prístrojom	Nezachytené lietadlá prístrojom
Okruhová výška do 2 400 stôp	13	16
Nižšia výška od 2 400 do 4 000 stôp	3	6

Výška nad 4 000 stôp	24	4
Suma	40	26

V tabuľke 2 je možné vidieť, koľkokrát prístroj správne vyhodnotil relatívnu výšku a relatívny smer. V 92,5 % prípadoch bola relatívna výška indikovaná správne na presnosť 200 stôp. Relatívny smer na presnosť pol kvadrantu bol presný v 82,5 % prípadoch.

Tabuľka 2 – Presnosť indikácií relatívnej výšky a smeru prístroja PCAS [Zdroj: Autor]

Parametre	Okruh do 2 400 stôp	Priestor nad 2 400 stôp	Suma
Správne vyhodnotená výška	2	35	37
Nesprávne vyhodnotená výška	0	3	3
Správne vyhodnotený smer	3	30	33
Nesprávne vyhodnotený smer	0	7	7

Najdôležitejším poznatkami je ale tabuľka 3, ktorá znázorňuje počet správneho zachytenia lietadiel prístrojom v relatívnej vzdialenosti menšej, ako je 3 NM a za podmienky, že indikácia hrozby v tejto vzdialenosti bola nepretržitá, s tolerovaným maximálne jedným 20 sekundovým výpadkom indikácie.

Tabuľka 3 – Počet zachytených a nezachytených lietadiel vo vzdialenosti 3 NM za špecifických podmienok [Zdroj: Autor]

Parametre	Správne zachytené (3NM)	Nesprávne zachytené (3NM)
Okruhová výška do 2 400 stôp	7	21
Nižšia výška od 2 400 do 4 000 stôp	1	4
Výška nad 4 000 stôp	13	2
Suma	21	27

Na základe tabuľky 3 až 56,25 % lietadiel nespĺňalo tieto kritéria bezpečnej a včasnej indikácie. V okruhovej výške to predstavovalo až 75 % nezachytených lietadiel. Vo vyšších výškach ako 4 000 stôp prístroj mal len 13 % neúspešnosť a až 87 % lietadiel bolo indikovaných správne.

Okrem 40tich úspešných zachytení lietadiel systém indikoval až 7 falošných hrozieb. Tieto falošné hrozby boli často indikované

v súvislosti s reálnou hrozbou, kde jeden parameter bol chybný a ostatné parametre boli totožné s reálnou hrozbou. V niektorých prípadoch prístroj vyhodnotil falošnú hrozbu až nebezpečne blízko.

Presnosť relatívnej vzdialenosti vyhodnocovať nebudeme. Hodnota relatívnej vzdialenosti vo väčšine prípadov experimentu bola až dvojnásobne chybná. Najpresnejšie prístroj ukazoval relatívnu vzdialenosť lietadiel, ktoré sa nachádzali vo vzdialenostiach hraničiacich dosahu prístroja.

3.3. Diskusia

Testovanie systému PCAS poukázalo na jeho výhody a nedostatky. Systém bol otestovaný v rôznych podmienkach členitého terénu v okolí Žiliny, kde dosah sekundárneho radaru je obmedzený.

Hlavnou výhodou takéhoto systému je jeho jednoduchosť, keďže takýto systém nepotrebuje byť zabudovaný do avioniky lietadla, nakoľko disponuje vlastným displejom a funguje na základe odpočúvania odpovedí z odpovedačov sekundárneho radaru, ktorými je prevažná väčšina lietadiel vybavená, nakoľko tento systém je dnes už úplne bežný. Žilinská univerzita v Žiline disponuje dvoma takýmito prístrojmi, a je veľmi jednoduché pred letom si ho vyzdvihnúť a veľmi jednoducho zapojiť do lietadla.

Prístroj PCAS na základe výsledkov z experimentálnych meraní je veľmi nespoľahlivý v nízkych okruhových výškach. V týchto výškach je naozaj potrebné byť obozretný pri vstupe do okruhu a nespoliehať sa na indikácie zo systému.

Vo vyšších výškach nad 4 200 stôp už ale prístroj vo viac ako 90 % prípadoch fungoval správne. Pokrytie sekundárnym radarom vo vyšších letových hladinách je už oveľa lepšie, čo sa preukázalo aj na spoľahlivosti prístroja. Až 87 % lietadiel bolo správne indikovaných prístrojom v relatívnej vzdialenosti menšej ako 3 NM.

Indikácie relatívnej výšky boli prevažne počas celého testovania správne. Vo väčšine prípadov sa jednalo iba o malé rozdiely do 200 stôp. Indikácie relatívneho smeru boli podobne spoľahlivé, avšak pri zatáčkach prístroj často začal vyhodnocovať nesprávny relatívny smer. Na druhú stranu indikácie o vzdialenosti boli počas celého testovania prevažne chybné, miestami dvojnásobne a tento údaj nie je možné pri používaní prístroja spoľahlivo používať.

Hoci protizrážkové prístroje fungujúce na základe systému ADS-B alebo FLARM môžu byť spoľahlivejšie, staršie lietadlá takýmito systémami často nedisponujú. Táto skutočnosť bola preukázaná aj počas testovania, kedy lietadlá PA-28 imatrikulačnej značky OM-DCR a OM-ARW, ktoré boli vybavené iba odpovedačom SSR boli viditeľné iba na systéme PCAS. Na obrazovke pre ADS-B in, ktorou disponujú niektoré lietadlá Viper SD4 prevádzkované Žilinskou univerzitou v Žiline z tohto dôvodu neboli vôbec zobrazené.

Systém PCAS nie je vhodným protizrážkovým prístrojom pre využívanie v nižších výškach na okruhoch. Pri takýchto letoch je využiteľnosť prístroja minimálna a lietadlá využívané na miestnu činnosť okruhov sú prevažne vybavené systémom ADS-B in, ktorý je nezávislý od signálov SSR.

Prístroj sa ale preukázal ako veľmi vhodným poradným a doplnkovým prostriedkom na identifikáciu lietadiel, ktoré sa nachádzajú vo vyšších výškach ako 4 200 stôp, a takých lietadiel, ktoré nie sú vybavené systémom ADS-B. Využívanie prístroja na palube lietadiel Viper SD4 vykonávajúcich činnosť v priestore, kde sa nachádzajú zostupové a približovacie roviny môže výrazne prispieť k bezpečnosti výcvikových letov, kde prístroj dokáže efektívne zachytiť IFR prevádzku, ktorá sa môže nachádzať v oblačnosti. Lietadlá lietajúce podľa prístrojov sa budú nachádzať zvyčajne vyššie, a zachytenie takejto prevádzky môže zvýšiť situačné povedomie žiaka alebo inštruktora. Nakoľko takéto dva prístroje sú k dispozícii, bolo by vhodné ich zakomponovať do výcviku ako redundanciu vizuálnej identifikácie práve na lietadlá lietajúce základný výcvik podľa VFR.

4. Záver

Cieľom tohto článku bolo posúdiť alternatívne protizrážkové systémy so zameraním na všeobecné letectvo a vykonať na jednom z nich experimentálne overenie činnosti.

Článok sa venoval vyhodnoteniu vykonaných experimentov. Počas piatich experimentálnych meraní s celkovým časom 12 hodín a 40 minút bolo otestovaných až 66 jednotlivých situácií, kedy lietadlo vletelo do dosahu zariadenia. Tieto merania dokázali, že systém PCAS v členitom teréne v okolí Žiliny dokáže spoľahlivo zachytiť prevádzku až pri výškach lietadiel nad 4 200 stôp. V nižších okruhových výškach je tento systém značne nespoľahlivý.

Na základe týchto poznatkov odporúčam využitie dvoch prístrojov PCAS, ktoré vlastní Žilinská univerzita v Žiline, pri výcvikových letoch v lietadlách, ktoré plánujú lietať v oblasti s IFR prevádzkou nachádzajúcou sa v oblačnosti pri zhoršenej viditeľnosti. Tieto prístroje po oboznámení sa s ich výhodami a nevýhodami prispievajú k zvýšeniu situačného povedomia a bezpečnosti. Ich jednoduchá inštalácia a odinštalácia z lietadla zabezpečí flexibilitu používania aj v ich menšom počte.

PodĎakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: "Výskum a vývoj bezkontaktných metód pre získavanie geopriestorových údajov za účelom monitoringu lesa pre zefektívnenie manažmentu lesa a zvýšenie ochrany lesov", kód ITMS 313011V465, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Referencie

- [1] EUROCONTROL . ACAS Guide [online]. 2022. In: eurocontrol.int. Dostupné na: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-03/eurocontrol-safety-acas-guide-4-1.pdf> [citované 2024-12-02]
- [2] ZAON SYSTEMS. XR2 Manual [online]. 2005. In: aircraftspruce.com. Dostupné na: <https://www.aircraftspruce.com/catalog/pdf/xr2manual.pdf> [citované 2025-03-02]



KOMPLEXNÉ MODELOVANIE PRÚDENIA OKOLO VIACZLOŽKOVÝCH KONFIGURÁCIÍ

Monika Timková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Pavol Pecho
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

V diplomovej práci bola riešená problematika návrhu a analýzy viaczložkových zakončení krídla s cieľom zlepšiť aerodynamické charakteristiky nosnej plochy. Študovaný bol vplyv dvoch konfigurácií typu wing-grid – s prvkami v rôznych výškach a s prvkami v jednej línii. Cieľom bolo navrhnúť riešenia prispievajúce k zníženiu indukovaného odporu, zvýšeniu vztlaku a zlepšeniu aerodynamickej efektívnosti. Navrhnuté 3D modely boli analyzované pomocou simulácií v softvéri Autodesk CFD pre rôzne uhly nábehu. Výsledky viaczložkových konfigurácií boli porovnané s referenčným krídlom a blended wingletom. Pre overenie simulácií bol vytvorený zmenšený model testovaný vo veternom tuneli. Na základe analýz bola určená najefektívnejšia konfigurácia, pričom sa potvrdilo zlepšenie aerodynamickej efektivity a mierne zníženie indukovaného odporu.

Keywords

Indukovaný odpor, wing-grid, viaczložková konfigurácia, aerodynamická efektivita, aerodynamika

1. Úvod

V aerodynamike sa kladie čoraz väčší dôraz na efektívne tvarovanie nosných plôch s cieľom optimalizovať letové vlastnosti, znížiť odpor a zvýšiť účinnosť letúnov. Jednou z oblastí, kde sa tieto snahy realizujú, je návrh koncových prvkov krídiel – wingletov. Tradičné winglety sú jednoprvkové konštrukcie, ktorých úlohou je znížiť indukovaný odpor obmedzením vzniku vírov na koncoch krídla. Viaczložková konfigurácia predstavuje usporiadanie viacerých samostatných, aerodynamicky interagujúcich prvkov, ktoré optimalizujú prúdenie, znižujú vírovú aktivitu a zlepšujú rozloženie tlaku. Táto diplomová práca sa zameriava na numerickú analýzu prúdenia okolo viaczložkových wingletov typu wing-grid, a to v dvoch koncepciách – s prvkami usporiadanými v jednej línii a v zostupovej rovine. Pomocou CFD simulácií sú preskúmané ich aerodynamické vlastnosti ako vztlak, odpor a aerodynamická efektivita. Cieľom je navrhnúť konfigurácie minimalizujúce indukovaný odpor a redukovúce víry na koncoch krídla. Osobitná pozornosť je venovaná analýze kritických oblastí aerodynamických interakcií, kde dochádza k výrazným stratám účinnosti. Výsledky umožňujú porovnať výkonnosť oboch konfigurácií a prinášajú poznatky o ich potenciálnom využití v letectve.

2. Základy aerodynamiky a mechaniky tekutín

Pod pojmom tekutina rozumieme látku, ktorá nemá vlastný tvar a na rozdiel od tuhých telies je nevratne deformovaná. Jej častice je možné ľahko uviesť do pohybu nepatrnou dotykovou silou a súdržnosť molekúl v daných látkach je veľmi malá. Z hľadiska stlačiteľnosti ich je možné rozdeliť do dvoch skupín, a to nestlačiteľné tekutiny, pričom tlak pôsobiaci na tekutinu len nepatrne zmení objem, napr. kvapaliny. Druhou skupinou sú stlačiteľné tekutiny, sem je možné zaradiť pary a plyny. [1]

2.1. Aerodynamické princípy prúdenia

Aerodynamika je významnou časťou mechaniky, ktorá sa zaoberá silovými účinkami pôsobiacimi na obtekané teleso ako aj zákonmi prúdenia vzduchu. Najpodstatnejšiu otázku predstavuje určenie vztlakovej sily, vďaka ktorej je možný samotný let letúnov.

2.1.1. Bernoulliho rovnica

Pre ideálnu kvapalinu bez hraničných vrstiev je povrch objektu prúdnicou. Ak je rýchlosť nízka a do prúdenia nie je pridaná žiadna energia, môžeme na určenie rozloženia tlaku použiť Bernoulliho rovnicu v prípade, že je známe rozloženie rýchlosti pozdĺž prúdnice. Pre nestlačiteľnú tekutinu, ako je voda alebo v našom prípade vzduch má tento vzťah nasledujúci tvar [2, 3]:

$$p_1 + \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot V_2^2}{2} = \text{konštanta} \quad (1)$$

2.1.2. Medzná vrstva

Aerodynamické sily výrazne ovplyvňuje viskozita tekutiny, pričom v blízkosti povrchu telesa vzniká medzná vrstva, kde rýchlosť vzduchu stúpa od nuly na povrchu až po rýchlosť voľného prúdu. Hrúbka tejto vrstvy narastá smerom k odtokovej hrane a jej vlastnosti zásadne ovplyvňujú vztlak a odpor. V rámci medznej vrstvy môže prúdenie prebiehať laminárne, teda usporiadane vo vrstvách, alebo turbulentne, kde dochádza k intenzívnemu premiešaniu a chaotickým zmenám rýchlosti, tlaku a hustoty. Pri turbulentnom prúdení sa využíva koncept vírvej viskozity, ktorá sa stanovuje pomocou simulácií. Odrhnutie medznej vrstvy pri nízkej energii prúdenia môže viesť k strate vztlaku, tzv. wing stallu. [1, 4]

2.2. CFD

Výpočtová dynamika tekutín (Computational Fluid Dynamics – CFD) je metóda umožňujúca matematickú predikciu a vizualizáciu prúdenia plynov a kvapalín, spolu s analýzou ich vplyvu na okolité prostredie. Moderné CFD softvéry využívajú pokročilé matematické modely a numerické metódy, pričom ich základom sú Navier-Stokesove rovnice opisujúce pohyb tekutín. Tieto rovnice môžu byť prispôbované konkrétnym aplikáciám pridaním alebo odstránením členov, napríklad pre simulácie prenosu tepla, fázových zmien alebo chemických reakcií. Na riešenie problematiky modelovania prúdenia okolo viaczožkových konfigurácií bol pre túto prácu zvolený CFD softvér od spoločnosti Autodesk, ktorý poskytuje pokročilé nástroje na simuláciu a analýzu aerodynamických vlastností. [5]

2.3. Aerodynamické sily

Prvým krokom k pochopeniu aerodynamických vlastností je porozumenie silám pôsobiacim na teleso počas letu. Medzi hlavné aerodynamické sily patrí vztlak, odpor, tiaž a ťah.

2.3.1. Vztlak

Vztlak predstavuje zložku aerodynamickej sily, ktorá pôsobí v smere vztlakovej osi, teda kolmo na trajektóriu letu. Keďže lietadlo sa počas rôznych fáz letu nemusí pohybovať paralelne so zemským povrchom, vztlak je lepšie definovať ako silu kolmú na smer pohybu lietadla. Na výpočet vztlaku krídla je potrebné určiť vztlakový koeficient, ktorý možno získať buď experimentálne, alebo z tabuliek pre jednotlivé profily krídiel. Ďalej je vztlak možné vypočítať:

$$L = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_L}{2} \quad (2)$$

Vztlak vzniká v dôsledku rozdielu tlakov okolo profilu krídla, spôsobeného prúdením vzduchu. Na hornej strane profilu sa prúdenie vplyvom uhla nábehu zrýchľuje, čím dochádza k priblíženiu prúdnic a zníženiu tlaku. Naopak, pod krídlom sa prúdenie spomaľuje a tlak stúpa. Podľa Bernoulliho rovnice a princípu spojitosti prúdenia môžeme pozorovať, že tlakový rozdiel medzi hornou a dolnou stranou profilu vytvára vztlak. [6, 7, 8]

2.3.2. Odpor

Odpor predstavuje druhú zložku výslednej aerodynamickej sily a pôsobí opačným smerom k pohybu lietadla. Jeho veľkosť významne ovplyvňuje rýchlosť letu. Je možné ho vypočítať podľa vzťahu:

$$D = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot S \cdot c_D}{2} \quad (3)$$

Aerodynamický odpor delíme na dva základné typy: parazitný odpor a indukovaný odpor. Parazitný odpor neprispieva k vytváraniu vztlaku, znižuje efektivitu letu a predstavuje jednu z kľúčových výziev v aerodynamickom návrhu. Naopak, indukovaný odpor je priamym dôsledkom tvorby vztlaku aerodynamickým povrchom, ako je napríklad krídlo. [6, 7, 8]

3. Viaczložkové konfigurácie

Viaczožkové konfigurácie predstavujú aerodynamické usporiadania, ktoré pozostávajú z viacerých komponentov alebo prvkov vzájomne ovplyvňujúcich prúdenie vzduchu. Typicky sa používajú na optimalizáciu aerodynamických vlastností, ako sú zvýšenie vztlaku, zníženie odporu, či efektívnejšia kontrola prúdenia. Medzi takéto konfigurácie patria napríklad viac-segmentové krídla, komplexné klapky alebo viaczožkové winglety, ktoré sú predmetom tejto práce.

3.1. Winglet

Efektivita moderných lietadiel sa výrazne zvyšuje znížením indukovaného odporu, ktorý tvorí až 40 % celkového odporu počas cestovného letu a až 80–90 % pri vzlete a stúpaní. Zväčšenie rozpätia krídla alebo použitie wingletov sú hlavné spôsoby jeho redukcie, pričom winglety efektívne „umelo“ zväčšujú rozpätie bez výrazného zvýšenia nárokov na konštrukciu. Ich nasadenie, prvýkrát rozšírené v roku 1988 pri Boeingu 747-400, prináša zníženie spotreby paliva o 4–6 %, skracuje vzletovú dráhu a zvyšuje stúpavosť, no zároveň zvyšuje ohybové momenty a môže mierne zvyšovať parazitný odpor. [9, 10]

Vývoj wingletov začal v 70. rokoch 20. storočia vďaka práci R. T. Whitcomba, ktorý navrhol prvý moderný winglet pre veľké lietadlá, čím sa výrazne zlepšil ich dolet a znížil odpor. Tip fence predstavujú jednoduché koncové dosky zvyšujúce vztlak a znižujúce indukovaný odpor, no zároveň zvyšujú parazitný odpor a hmotnosť. Canted winglety majú šikmý prechod medzi krídlom a wingletom a ich optimálny uhol sklonu výrazne ovplyvňuje aerodynamickú účinnosť pri rôznych fázach letu. Blended winglety sa vyznačujú plynulým prechodom medzi krídlom a wingletom, čo znižuje miestne separácie prúdenia a celkový odpor; známy zástupca je Airbus Sharklet. Split winglety, vylepšenie blended dizajnu, kombinujú hornú a dolnú časť wingletu a poskytujú ešte vyššiu efektivitu, pričom sa využívajú napríklad na Boeingu 737. Spiroid winglety majú tvar slučky a výrazne znižujú vírové štruktúry na koncoch krídla, čím zlepšujú dolet aj možnosti hustejšej letovej prevádzky. Inovatívne riešenie tip sails využíva sústavu menších plôch na koncoch krídla na rozptýlenie vírov a zníženie indukovaného odporu, avšak vyžaduje starostlivé riešenie interferencie medzi prúdnicami. Moderné štúdie tiež skúmajú alternatívne riešenia, ktoré kombinujú poznatky z konvenčných aj pokročilých návrhov. [11]

3.1.1. Wing-grid

Wing-grid predstavuje netradičný prístup ku konštrukcii wingletu, založený na použití viacerých malých, paralelných plôch na koncoch krídla, ktoré vytvárajú sériu menších vírov namiesto jedného veľkého. Vzájomné interakcie týchto malých vírov vedú k ich rýchlejšiemu rozpadu a k výraznému zníženiu celkovej vírovej energie za krídlom. Tento efekt spôsobuje rovnomernejšie rozloženie vztlaku a významne znižuje indukovaný odpor. Wing-grid sa ukazuje ako perspektívna alternatíva klasických wingletov. [12]

4. Metodika a metódy skúmania

Primárnym cieľom práce bol návrh viaczožkového zakončenia krídla a analýza jeho vplyvu na prúdenie, tvorbu vírových štruktúr a aerodynamické vlastnosti pri rôznych uhloch nábehu. Prostredníctvom CFD simulácií boli vytvorené viaceré varianty konfigurácií, ktorých aerodynamické charakteristiky (vztlak, odpor, aerodynamická jemnosť) boli následne analyzované a porovnané. Teoretická časť sa opiera o syntézu odborných článkov a literatúry, najmä v oblasti nekonvenčných zakončení typu wing-grid. Skúmané boli vplyvy usporiadania prvkov, použité profily a ich uhly nastavenia. Výpočty koeficientov vztlaku a odporu umožnili vytvoriť vztlakové a odporové krivky, ako aj poláry konfigurácií, na základe čoho bola vykonaná komparácia výsledkov jednotlivých návrhov s čistým krídlom a blended wingletom. Keďže výsledky z programu Autodesk CFD nemusia byť plne presné, testovanie prebehlo aj experimentálne vo veternom tuneli na zmenšenom 3D modeli. V závere boli vyhodnotené optimálne konfigurácie a načrtnuté možnosti ďalšieho výskumu v oblasti geometrie a veľkosti wing-grid konfigurácií.

5. Návrh optimalizácie viaczožkových konfigurácií

Optimalizácia viaczožkových konfigurácií predstavuje kľúčový krok v procese návrhu aerodynamicky efektívnych prvkov lietadla, v našom prípade krídla a wingletov. Daná kapitola sa zameriava na detailnú analýzu geometrických charakteristík a aerodynamických vlastností navrhnutých konfigurácií, ktoré boli modelované v programe Autodesk Inventor. Ako prvé bola potreba modelácie samotného krídla s rozpätím krídla 2400 mm s tetivou o dĺžke 640 mm, na ktoré budú následne upevňované rôzne druhy zakončenia.

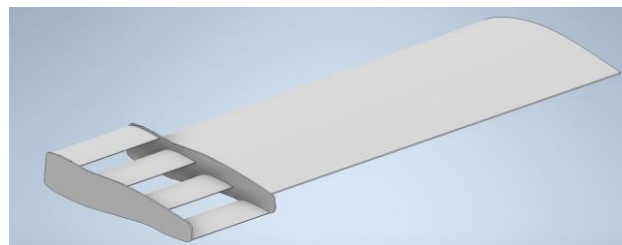
5.1. Návrh konfigurácií wingletov

Pre simulácie prúdenia boli navrhnuté dve základné konfigurácie, ktoré boli následne optimalizované s cieľom dosiahnuť priaznivejšie aerodynamické vlastnosti. Obe konfigurácie pozostávajú zo štyroch aerodynamických prvkov usporiadaných v sériovom slede, pričom ich vzájomná geometria a relatívna poloha boli predmetom ďalších úprav s cieľom minimalizovať aerodynamický odpor, tvorbu vírov za krídlom a maximalizovať generovaný vztlak. Oba primárne návrhy sú inšpirované koncepciou wing-grid popísanou vyššie.

5.1.1. Návrh A

V prvom návrhu viaczožkového wingletu bol skúmaný koncept inšpirovaný systémom *wing-grid*, kde štyri aerodynamické plochy nie sú usporiadané za sebou, ale v zostupnej rovine. Na ich upevnenie bola potrebná pridaná vertikálna plocha, ktorá zároveň ovplyvňovala prúdenie. Zámerom bolo rozdeliť koncový vír krídla na viacero menších, čím by sa znížil indukovaný odpor a zvýšila celková aerodynamická efektivita. Počiatočný návrh obsahoval ostré hrany, ktoré sa v simuláciách prejavili ako aerodynamicky nevhodné kvôli nárastu čelného odporu a separácii prúdenia. Preto došlo k optimalizácii geometrie, vrátane zaoblenia hrán a úpravy vertikálnych spojov, čo výrazne zlepšilo prúdenie okolo celej konfigurácie. Finálna verzia wingletu dosiahla dĺžku 576 mm a hĺbku 680 mm. Pre jednotlivé konfigurácie boli testované tri typy profilov, na základe ktorých ich delíme na tri varianty:

- Variant 1 – boli použité nesymetrické profily zo série NACA, konkrétne profil NACA 632-615. Tento profil bol vybraný na základe jeho vhodných aerodynamických vlastností, pričom bol nastavený na uhol 2°.
- Variant 2 – Ako alternatíva bol skúmaný aj profil NACA 1410, ktorý sa vyznačuje menšou hrúbkou. Tento aspekt vedie k redukcii odporu, čo môže byť výhodné z hľadiska aerodynamickej efektivity. Profily boli nastavené na uhol 3°, avšak v rámci analýzy boli testované aj pri uhle 0°. Výsledky pri nulovom uhle nábehu boli menej priaznivé, čo naznačuje, že vyšší uhol nastavenia je v tomto prípade výhodnejší.
- Variant 3 – použitý bol symetrický profil NACA 0006. Vytvorené boli tri varianty so zvolenými uhlami nastavenia: 5°, 6° a 7°. Taktiež bol zvolený aj nulový uhol nastavenia jednotlivých segmentov, avšak hodnoty vztlaku aj odporu boli nepriaznivé, preto sa ďalej s daným uhlom nepracovalo. Cieľom bolo analyzovať vplyv zmeny uhla nastavenia na aerodynamické vlastnosti a nájsť optimálnu konfiguráciu.

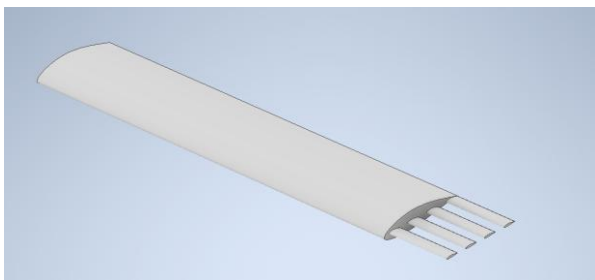


Obrázok 1 Návrh A

5.1.2. Návrh B

Ďalšia navrhnutá konfigurácia vychádza taktiež z koncepcie wing-grid, avšak modelované boli štyri aerodynamické prvky zoradené za sebou v jednej línii bez potreby vertikálneho úchyty. Každý prvok mal tetivu 100 mm a vzájomný rozstup medzi nimi bol 70 mm.

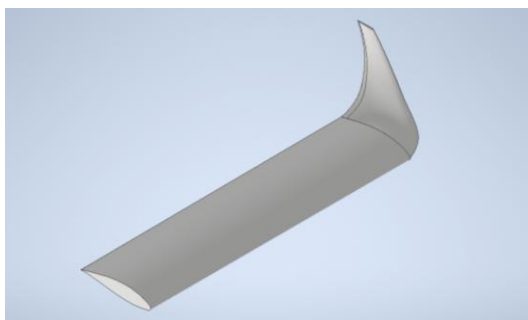
- Variant 1 – V prípade nesymetrického profilu bol použitý, ako aj v predchádzajúcom návrhu, aerodynamický profil NACA 63(2)-615, ktorý bol nastavený na uhol 0°, keďže pri nesymetrickom profile je eliminovaná potreba dodatočného naklopenia na generovanie vztlaku. Celková dĺžka prvkov je 400 mm.
- Variant 2 – Pre symetrický variant bol zvolený profil NACA 0006, ktorý bol nastavený na uhol 5°. Tento uhol bol zvolený s cieľom zabezpečenia požadovaného vztlaku a optimálnych aerodynamických vlastností. Bol navrhnutý aj variant s menším rozpätím jednotlivých prvkov, konkrétne 320 mm. Tento dizajn sa však ukázal ako neefektívny, keďže pokles vztlaku prevýšil zníženie odporu.



Obrázok 2 Návrh B

5.1.3. Blended winglet

Pre komplexné porovnanie aerodynamických charakteristík a efektivity viaczožkových wingletov bol v rámci modelovania zahrnutý aj tzv. blended winglet. Tento typ wingletu sa vyznačuje plynulým prechodom medzi krídlom a vertikálnym zakončením, čím dochádza k optimalizácii aerodynamických vlastností a zníženiu indukovaného odporu. Ako aerodynamický profil pre návrh blended wingletu bol zvolený symetrický profil NACA 0009, pričom jeho tetiva sa postupne zmenšovala po rozpätí wingletu.



Obrázok 3 Blended winglet

5.2. Testovanie navrhnutých modelov

Za účelom získania aerodynamických charakteristík jednotlivých konfigurácií bolo nevyhnutné pristúpiť k ich numerickej analýze prostredníctvom počítačovej simulácie. Navrhnuté geometrické modely boli podrobené simuláciám v prostredí výpočtového softvéru, v ktorom bol numericky modelovaný proces obtekania objektov prúdiacou tekutinou. Na základe výsledkov simulácií boli následne stanovené aerodynamické sily pôsobiace na jednotlivé konfigurácie, konkrétne aerodynamický vztlak a celkový odpor, ktoré predstavujú kľúčové parametre pre výpočet nasledovných koeficientov a síl umožňujúcich porovnanie nami vytvorených návrhov.

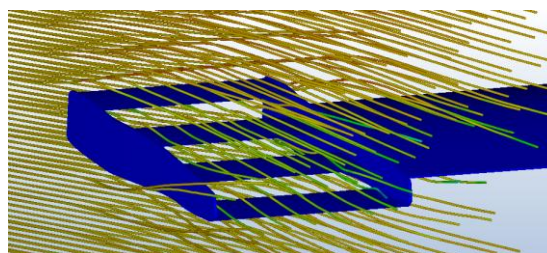
Pre presné výsledky a ich možné porovnanie bolo potrebné nastaviť prostredie, v ktorom prebiehali simulácie identicky pre každý navrhnutý model. Podmienky boli nasledovné:

- Rýchlosť prúdenia vzduchu: 30 m/s
- Tlak na výstupe: 0 Pa
- Teplota: 20°C
- Hustota: daná programom na základe zvoleného plynu (vzduch)

- Jemnosť siete: 0,75

5.2.1. Počiatočná numerická analýza a optimalizácia návrhových konfigurácií

Počiatočné numerické analýzy oboch návrhov viaczožkových wingletov sa zamerali na optimalizáciu geometrie a nastavenia profilov s cieľom zlepšiť aerodynamickú účinnosť. Pri návrhu A, inšpirovanom konceptom wing-grid, sa ukázali ako problematické ostré hrany a vertikálne úchyty, ktoré generovali nadmerný odpor. Optimalizáciou geometrie a zmenou uhla nastavenia profilov z 0° na 2° sa podarilo zvýšiť vztlak a zlepšiť celkový pomer vztlaku k odporu. Testovanie ďalších variantov s tenšími a symetrickými profilmi potvrdilo, že vhodnou kombináciou profilu a jeho nastavenia možno zredukovať vírenie a zlepšiť rozpad vírových štruktúr za krídlom.



Obrázok 4 Vizualizácia obtekania návrhu A

V prípade návrhu B, ktorý neobsahoval vertikálne spojovacie prvky, bol identifikovaný dodatočný odpor vznikajúci pri odtokovej hrane. Tento bol eliminovaný optimalizáciou rozmiestnenia segmentov a skrátením ich tetivy. Simulácie taktiež ukázali, že hoci úprava uhla nastavenia na 2° viedla k nárastu odporu a poklesu vztlaku, pôvodné nastavenie 0° zostalo efektívnejšie. Zníženie dĺžky segmentov z 400 mm na 320 mm síce zlepšilo hmotnostné parametre, ale negatívne ovplyvnilo pomer vztlaku a odporu, čím sa potvrdil význam dĺžky segmentov pre výsledné aerodynamické vlastnosti.

5.2.2. Simulácie vykonávané na optimalizovaných návrhoch

Po ukončení počiatočného testovania a následných úprav jednotlivých konfigurácií bolo možné zamerať sa na evaluáciu výsledných modelov, ktoré disponovali najpriaznivejšími aerodynamickými výsledkami. Prvotný uhol nábehu 0° bol postupne zvyšovaný o 2,5° až kým nedosiahol hodnotu 15°, keďže tieto hodnoty predstavujú bežné prevádzkové uhly dosahované letúnmi. Následne boli vykonané dodatočné simulácie pre vyššie uhly nábehu a to 20 a 25 stupňov. Postupné zvyšovanie uhla nábehu v krokoch po 2,5° bolo zvolené s cieľom dosiahnuť detailnejšie vykreslenie priebehu vztlakovej a odporovej krivky, ako aj presnejšiu identifikáciu požadovaných aerodynamických charakteristík a ich zmenu závislú na uhle nábehu.

5.3. Vztlkové krivky

Na účely porovnania schopnosti jednotlivých konfigurácií generovať vztlak boli vytvorené vztlkové krivky, ktoré znázorňujú závislosť súčiniteľa vztlaku od uhla nábehu. Analýza sa zamerala na lineárnu časť tejto závislosti v oblasti malých uhlov, relevantných pre bežný let, pričom sa zámerne vynechala

oblasť odtrhnutia prúdenia kvôli výpočtovej náročnosti. Tento prístup umožnil efektívne vyhodnotiť aerodynamickú efektívnosť jednotlivých návrhov bez potreby simulovať celé spektrum letových režimov.

5.4. Odporové krivky

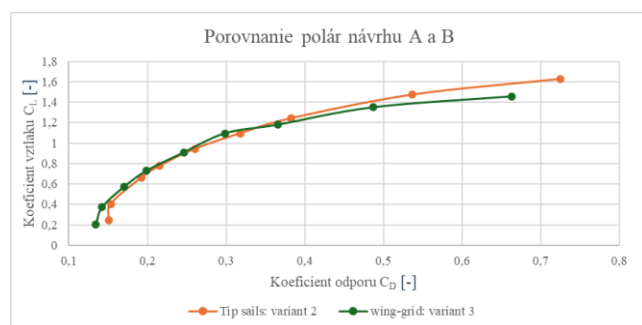
V ďalšej fáze analýzy bol skúmaný celkový aerodynamický odpor jednotlivých konfigurácií zakončení krídla, ktorý spolu so vztlakom určuje ich celkovú aerodynamickú efektívnosť. Odporové krivky boli získané z numerických simulácií podobným spôsobom ako vztlakové, pričom cieľom bolo identifikovať konfigurácie s čo najnižším súčiniteľom odporu C_{DCD} . Výsledky boli spracované do grafov a tabuliek, ktoré umožnili detailné porovnanie priebehu odporu pri rôznych uhloch nábehu. Táto analýza vytvorila základ pre komplexné zhodnotenie výhodnosti jednotlivých návrhov z pohľadu aerodynamickej účinnosti.

5.5. Aerodynamická jemnosť

Na získanie uceleného pohľadu na aerodynamickú efektívnosť jednotlivých konfigurácií bola vykonaná analýza tzv. aerodynamickej jemnosti, teda pomeru vztlaku k odporu. Tento parameter umožňuje posúdiť, ako efektívne daný model premieňa vztlak pri minimálnom odpore. Výsledky boli spracované formou polárnych kriviek, ktoré zobrazujú závislosť medzi súčiniteľom vztlaku a odporu pri rôznych uhloch nábehu. Tieto krivky umožnili komplexné porovnanie navrhnutých konfigurácií a identifikáciu najvýhodnejšieho riešenia z hľadiska celkovej aerodynamickej účinnosti.

5.5.1. Komparácia optimálnych variantov oboch návrhov

Na základe predchádzajúcich analýz polár jednotlivých konfigurácií boli z oboch návrhov vybrané najvýkonnejšie varianty. Konkrétne variant 3 s použitím symetrického profilu NACA 0006 s uhlom jeho nastavenia na 5 stupňov s vertikálnymi spojovacími plochami z návrhu A. Z návrhu B bez daných uchytení bol vybraný variant 2, pri ktorom je taktiež využitý totožný symetrický profil s uhlom nastavenia 3 stupne. Ich priame porovnanie je znázornené v grafe na obrázku nižšie.



Obrázok 5 Porovnanie polár vybraných variantov návrhu A a návrhu B

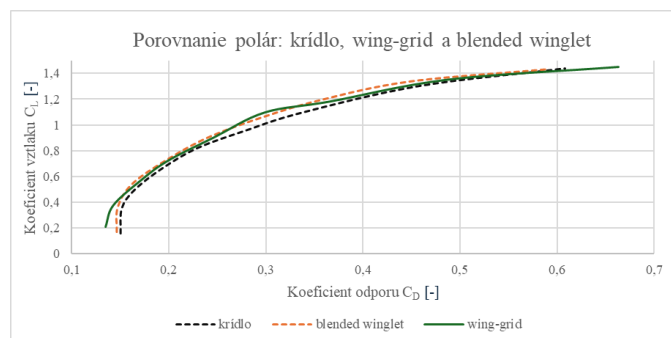
Na základe pomeru vztlakového a odporového koeficientu (CL/CD) možno konštatovať, že v rozsahu uhlov nábehu do približne 10° vykazuje návrh A vyššiu aerodynamickú efektívnosť. Opačná tendencia sa prejavuje pri vyšších uhloch nábehu, kde návrh B dosahuje priaznivejšie výsledky, čo potvrdzuje naše tvrdenia o jeho vhodnosti pre podmienky letu vo vyššom

rozsahu AoA, kde môže dochádzať k výraznejšiemu prúdeniu v oblasti koncových častí krídla. Vzhľadom na zameranie práce a zohľadnenie reálnych letových režimov, teda prevažne stredné uhly nábehu charakteristické pre bežnú prevádzku, bola za efektívnejšiu vyhodnotená konfigurácia návrhu A. Táto preukázala stabilnejšiu a efektívnejšiu aerodynamickú výkonnosť práve v rozsahu, ktorý má z praktického hľadiska najväčší význam.

5.6. Komparácia vybraného variant viaczložkovej konfigurácie s krídlom a konvenčným wingletom

Ďalší krok predstavoval komparáciu aerodynamických charakteristík vybraného návrhu zakončenia krídla s blended wingletom a samotným krídlom. Prvým krokom bol výpočet aerodynamických koeficientov vztlaku a odporu pre jednotlivé uhly nábehu vzduchu.

Analýza aerodynamickej poláry ukázala, že implementácia viaczložkového wingletu typu wing-grid spôsobuje posun polárnej krivky smerom nahor, čo je dôsledkom nárastu vztlaku sprevádzaného miernym zvýšením odporu. Tento jav vedie k zlepšeniu pomeru vztlaku a odporu (CL/CD), najmä pri nižších a stredných uhloch nábehu, približne do 15° . V tomto rozsahu dosahuje krídlo s viaczložkovým wingletom výrazne vyššie hodnoty vztlaku ako referenčné krídlo bez wingletu.



Obrázok 6 Zmena poláry krídla po upevnení viaczložkového wingletu a po upevnení blended wingletu

Pri vyšších uhloch sa priebehy polár jednotlivých konfigurácií zbíhajú, no aj napriek tomu si viaczložkové riešenie zachováva výhodu v celkovom hodnotení aerodynamickej efektivity. V porovnaní s klasickým blended wingletom však konfigurácia wing-grid nevykazuje také priaznivé výsledky v celom rozsahu – najmä v oblasti stredných hodnôt odporu ($CD \approx 0,3 - 0,5$), kde blended winglet dosahuje výrazne vyšší vztlak pri rovnakom odpore, čo poukazuje na jeho schopnosť efektívnej redukcie indukovaného odporu. Naopak, konfigurácia wing-grid generuje vyšší vztlak len pri veľmi nízkych uhloch nábehu, zatiaľ čo pri vyšších uhloch sa prejavuje jej vyšší aerodynamický odpor spôsobený väčšou celkovou plochou doplnkových prvkov. Tento dodatočný odpor síce prispieva k potlačeniu vírových štruktúr, no zároveň negatívne ovplyvňuje celkovú aerodynamickú jemnosť. Výrazná odchýlka v polárnej krivke pri uhle nábehu $12,5^\circ$, kde konfigurácia wing-grid presahuje výkon blended wingletu, bola identifikovaná ako pravdepodobný dôsledok numerickej nepresnosti, nie ako skutočný aerodynamický efekt.

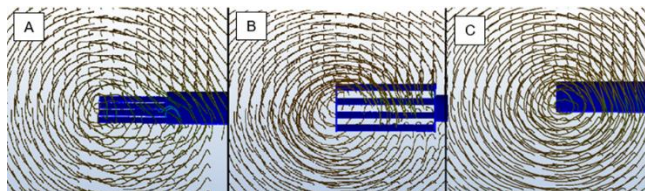
5.7. Indukovaný odpor

Hlavným cieľom práce je zistenie vplyvu návrhov zakončenia krídla na indukovaný odpor a na víry tvoriace sa na konci krídla. Na základe vykreslených polár pre jednotlivé návrhy, boli odhadnuté uhly nábehu pri nulovom C_L , následne boli vykonané dodatočné simulácie pre dané uhly. Na ich základe boli zistené hodnoty celkového odporu pri nulovom vztaku a následne vypočítaný koeficient odporu podľa vzorca:

$$C_D = C_{D0} + C_{Di} \quad (4)$$

Analýza nebola realizovaná pre uhly nábehu 0° a $2,5^\circ$, nakoľko pri takto nízkych hodnotách uhla nábehu je indukovaná zložka aerodynamického odporu zanedbateľná. S rastúcim uhlom nábehu dochádza k postupnému zvyšovaniu indukovaného odporu, preto boli do analýzy zahrnuté len prípady, pri ktorých má táto zložka relevantný vplyv na celkové aerodynamické správanie krídla.

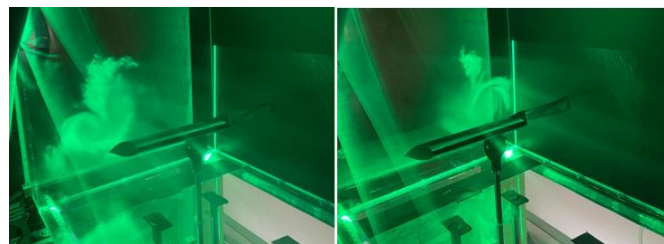
Pri uhle nábehu 5° vykazuje blended winglet najnižší koeficient indukovaného odporu spomedzi všetkých testovaných konfigurácií, čo je dôsledok jeho optimalizovaného tvaru a plynulého prechodu medzi hlavným krídlom a koncovou plochou. Viaczložkové konfigurácie typu wing-grid síce pri nízkych uhloch dosahujú mierne vyšší indukovaný odpor v dôsledku zložitejšej geometrie a interakcií prúdenia, no ich efektívnosť rastie so zvyšujúcim sa uhlom nábehu. Najmä konfigurácia návrhu A postupne preukazuje schopnosť účinnejšej redukcie indukovaného odporu v porovnaní s návrhom B i referenčným krídlom, hoci úroveň optimalizácie dosahovaná blended wingletom zostáva nedosiahnutá.



Obrázok 7 Vizualizácia vírov tvoriacich sa na konci krídla s použitím zakončenia : A) wing-grid bez vertikálneho uchytenia; B) wing-grid s uchytením; C) bez wingletu

6. Experimentálne overenie výsledkov

Finálnou fázou výskumu bolo experimentálne overenie výsledkov numerických simulácií realizovaných v prostredí Autodesk CFD, a to pomocou meraní vo veternom tuneli. Z dôvodu technických problémov s meracím zariadením vo veternom tuneli nebolo možné uskutočniť úplné kvantitatívne overenie aerodynamických charakteristík testovaných konfigurácií. Napriek tomu sa podarilo zrealizovať experimenty zamerané na vizualizáciu prúdenia okolo základného krídla a konfigurácie s viaczožkovým wingletom typu wing-grid. Pozorovania vírových štruktúr ukázali určitú stabilizáciu a štruktúrovanie prúdenia pri použití viaczožkovej konfigurácie, no dominantný koncový vír zostal zachovaný. Hoci numerické simulácie naznačovali výraznejší prínos tejto konfigurácie pri redukcii indukovaného odporu, experimentálne pozorovania tieto výsledky plne nepotvrdili, čím poukazujú na rozdiel medzi simulovaným a reálnym aerodynamickým správaním.



Obrázok 8 Testovanie koncových vírov vo veternom tuneli

7. Výsledky

Na základe numerických simulácií a aerodynamických výpočtov sa ako najefektívnejšia konfigurácia viaczožkového zakončenia krídla typu wing-grid ukázal návrh A s použitím symetrického profilu NACA 0006 a uhlom nastavenia plôšok 5° , ktorý dosahoval najlepší pomer vztaku k odporu v rozsahu uhlov nábehu do 15° . Hoci pri vyšších uhloch nábehu poskytovali lepšie výsledky nesymetrické profily, celkovo boli symetrické, tenšie profily výhodnejšie najmä vďaka priaznivejšiemu rastu vztaku voči odporu. Usporiadanie prvkov v jednej línii viedlo k zníženiu indukovaného odporu, hoci len v obmedzenom rozsahu. CFD simulácie síce predpokladali výrazné potlačenie vírových štruktúr, no experimentálne pozorovania ukázali pretrvávanie dominantného koncového víru, čo poukazuje na limity numerických modelov. Finálny návrh, vybraný aj pre experimentálne testovanie, potvrdil potrebu ďalšieho výskumu geometrických parametrov konfigurácie s cieľom zvýšiť aerodynamickú efektívnosť pri zachovaní priaznivých vztakových vlastností a zmenšení rozmerov.

8. Záver

Diplomová práca sa zameriavala na komplexnú analýzu aerodynamických vlastností viaczožkových zakončení krídla typu wing-grid, pričom boli porovnávané dve základné konfigurácie – návrh A s vertikálnou opornou plochou a návrh B s lineárnym usporiadaním prvkov. Cieľom bolo preskúmať ich vplyv na štruktúru prúdenia a tvorbu koncových vírov pomocou CFD simulácií. Výsledky ukázali, že najvyššiu aerodynamickú jemnosť pri nižších uhloch nábehu dosahovala konfigurácia návrhu A s profilom NACA 0006 a uhlom nastavenia plôšok 5° , zatiaľ čo pri vyšších uhloch bola výhodnejšia konfigurácia s profilom NACA 1410. Experimentálne testovanie vo veternom tuneli potvrdilo len čiastočne predpoklady zo simulácií, pričom vírové štruktúry boli menej výrazne potlačené než očakávané. Práca poukazuje na dôležitosť vhodnej voľby geometrie a profilu prvkov a otvára priestor pre ďalší výskum zameraný na optimalizáciu viaczožkových zakončení krídla.

Referencie

- [1] Technická univerzita v Košiciach (2017). Mechanika tekutín. Skriptá. Online. Dostupné na: https://oaze.fberg.tuke.sk/wp-content/uploads/2017/12/Mechanika-tekutin_skripta-1.pdf [citované 2024-09-20]
- [2] MARCHMAN, James F. (2022). Aerodynamics and Aircraft Performance. Tretie vydanie. Virgínia: Independently published, s. 1-21.

[3] VYKOUK, Vlastimil (1981). Aerodynamika a mechanika letu pro piloty závěsných kluzáků. Praha: Ústřední výbor Svazu pro spolupráci s armádou. Dostupné na: https://www.laa.sk/wp-content/uploads/2013/03/aerodynamika_a_mechanika_letu.pdf

[4] Glenn Research Center (2024). NASA. Boundary Layer. Online. Dostupné na: <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/boundary-layer/#boundary-layer> [citované 2024-09-23]

[5] SimScale (2024). SimScale. What is CFD. Online. Dostupné na: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/> [citované 2024-12-06]

[6] FAA (2023). faa.gov. Chapter 5: Aerodynamics of Flight. Online. Dostupné na: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/07_phak_ch5_0.pdf [citované 2024-11-10]

[7] Free online private pilot ground school (bez dát). Aerodynamics. Online. Dostupné na: <http://www.free-online-private-pilot-ground-school.com/aerodynamics.html> [citované 2024-11-10]

[8] BUGAJ, Martin (2015). Aerodynamika 1. Bratislava: Dolis.

[9] World Aviation (bez dát). World aviation flight academy. Winglets or wingtip devices. Online. Dostupné na: <https://worldaviationato.com/es/que-son-winglets-dispositivos-punta-alar/> [citované 2024-12-03]

[10] GUERRERO, J; SANGUINETI, M a WITTKOWSKY, K (2020). Variable cant angle winglets for improvement of aircraft flight performance. Online. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/344268645_Variable_cant_angle_winglets_for_improvement_of_aircraft_flight_performance/figures?lo=1 [citované 2024-12-03]

[11] . COSIN, R.; CATALANO, F.M.; CORREA, L.G.N.; ENTZ, R.M.U (2017). Aerodynamic analysis of multi-winglets for low speed aircraft. In: 27th International congress of the aeronautical science. São Paulo: Engineering School of São Carlos, s. 150-160.

[12] LA ROCHE, U. a PALFFY, S. (bez dát). ICAS. Wing-grid, a novel device for reduction of induced drag on wings. Online. Dostupné na: [https://www.icas.org/icas_archive/ICAS1996/ICAS-96-2.10\(R\)_2.pdf](https://www.icas.org/icas_archive/ICAS1996/ICAS-96-2.10(R)_2.pdf) [citované 2024-12-18]



INTEGRÁCIA BEZPILOTNÝCH LETECKÝCH SYSTÉMOV

Denis Valášek

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Branislav Kandra

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Radoslava Nichtová

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article explores the integration of unmanned aerial systems (UAS) into civil airspace, focusing on collision avoidance technologies and remote identification systems. As drone operations expand, ensuring safety and interoperability becomes essential. The study reviews systems such as TCAS, ACAS, ADS-B, and FLARM, and highlights their adaptability for UAS. EU regulations 2019/947 and 2019/945 are addressed with regard to Remote ID requirements. Practical testing of Dronetag Beacon Gen. 2 and Aerobits TR-1F at Žilina Airport demonstrated accurate and stable data transmission, confirming their suitability for UAS integration. The findings underline the need for both technological innovation and regulatory alignment to safely merge manned and unmanned traffic.

Keywords

Unmanned aerial systems (UAS). collision avoidance systems. Dronetag Beacon. Aerobits TR-1F. ADS-B. FLARM. TCAS. UAS detection. Aviation safety.

1. Úvod

Bezpilotné letecké systémy (UAS) sa v posledných rokoch stali dôležitou súčasťou civilného aj komerčného letectva. Ich využitie rýchlo rastie v oblastiach ako sú monitorovanie prostredia, logistika, infraštruktúrne inšpekcie či záchranné operácie. Tento vývoj však kladie nové nároky na bezpečnosť, kontrolu a integráciu do riadenej leteckej prevádzky. Na rozdiel od pilotovaných lietadiel, ktoré operujú v presne regulovanom prostredí s certifikovanými systémami, UAS často využívajú technológie vo vývoji. Integrácia týchto systémov si preto vyžaduje nielen technologické inovácie, ale aj nové štandardy identifikácie, detekcie a legislatívnu podporu. Cieľom príspevku je analyzovať možnosti integrácie UAS do civilného vzdušného priestoru, s dôrazom na protizrážkové technológie a diaľkovú identifikáciu. V praktickej časti sú prezentované výsledky testovania zariadení Dronetag Beacon Gen. 2 a Aerobits TR-1F, ktoré boli overené v reálnych podmienkach na letisku Žilina. Výsledky poukazujú na pripravenosť týchto technológií na nasadenie a zároveň podčiarkujú potrebu harmonizácie pilotovanej a bezpilotnej prevádzky, najmä v kontexte iniciatív SESAR, U-Space a regulačných rámcov EÚ.

2. Metodika a metódy skúmania

2.1. Diaľková identifikácia bezpilotných leteckých systémov

S rastúcim počtom UAS vo vzdušnom priestore vzniká potreba ich jednoznačnej a spoľahlivej identifikácie. Diaľková identifikácia (Remote ID, RID) umožňuje elektronický prenos informácií o polohe, pohybe a stave bezpilotného systému v reálnom čase, čím zvyšuje bezpečnosť prevádzky a umožňuje spätnú identifikáciu v prípade incidentov.

RID je technologickou analógiou k evidenčnému číslu v cestnej doprave, avšak v digitálnej, dynamickej forme. V EÚ je jeho používanie upravené nariadeniami č. 2019/945 a 2019/947, ktoré stanovujú povinnosť jeho využívania pre väčšinu dronov od 1. januára 2024 [1] [2] [3].

Ciele RID:

- Zvýšiť situačné povedomie vo vzdušnom priestore,
- Umožniť identifikáciu UAS a operátora v reálnom čase,
- Podporiť zásahy autorít pri narušeníach,
- Pripraviť infraštruktúru pre U-space a automatizované riadenie UAS.

2.2. Priama diaľková identifikácia

Priama identifikácia funguje prostredníctvom krátkodosahových technológií (Bluetooth Low Energy, Wi-Fi NAN) bez potreby pripojenia na internet. UAS vysiela údaje ako poloha, výška, kurz či sériové číslo v okruhu niekoľko stoviek metrov. Výhodou je nízka energetická náročnosť a nezávislosť od mobilnej siete.

Typické výhody:

- Nízka zložitosť a náklady,
- Prevádzka aj bez internetu,
- Ideálne pre hobby lety a VLOS misie.
- Nevýhody:
 - Obmedzený dosah (300 m – 3 km),
 - Nutnosť blízkosti prijímača.

Príklad: Dronetag Beacon Gen. 2 Externý modul spĺňajúci legislatívne požiadavky EÚ, ktorý zabezpečuje Bluetooth identifikáciu UAS a umožňuje spätné spracovanie dát.

2.3. 1.1.2 Sieťová diaľková identifikácia

Sieťová identifikácia využíva prenos údajov cez mobilnú sieť (napr. LTE, 5G) do cloudového systému. UAS odosiela dáta o svojej polohe a stave cez internet, kde sú prístupné oprávneným subjektom – napríklad U-space poskytovateľom, letiskám alebo polícii.

Výhody:

- Prakticky neobmedzený dosah (v rámci pokrytia),
- Možnosť centralizovaného spracovania a archivácie,
- Kompatibilita s riadiacimi systémami (napr. UTM).

Nevýhody:

- Závislosť na mobilnom pripojení,
- Vyššia spotreba energie,
- Nároky na kybernetickú bezpečnosť.
- Príklad: Dronetag RIDER

Moderný modul, ktorý kombinuje sieťovú a priamu identifikáciu. Je určený na profesionálne nasadenie, vrátane BVLOS letov, a podporuje komunikáciu s U-space systémami[1] [2] [3].

2.4. Analýza súčasného stavu

S rastúcim využitím bezpilotných systémov (UAS) vo vzdušnom priestore rastie potreba ich bezpečnej integrácie. Kľúčovou výzvou je schopnosť UAS detegovať prekážky a potenciálne konflikty. Na rozdiel od pilotovaných lietadiel musia UAS využívať ľahké a energeticky efektívne riešenia.

Moderné UAS využívajú rôzne senzorové technológie:

- Ultrazvukové a infračervené senzory na krátku vzdialenosť, najmä pri pristávaní.
- LiDAR systémy poskytujú presné 3D mapy vhodné pre zložené prostredie.
- Kamery a počítačové videnie s umelou inteligenciou umožňujú detekciu a klasifikáciu objektov.
- Miniaturne radary a ToF kamery zabezpečujú detekciu v zníženej viditeľnosti.

Kombinácia týchto technológií v rámci tzv. senzorovej fúzie zvyšuje spoľahlivosť a presnosť detekcie. Pokročilé softvérové riešenia využívajú algoritmy „Detect and Avoid“ (DAA), ktoré umožňujú autonómne plánovanie vyhýbacích manévrov. Vývoj týchto systémov je podporovaný organizáciami ako ICAO a EASA.

Medzi pretrvávajúce výzvy patrí:

- obmedzená nosnosť malých dronov,

- energetická náročnosť senzorov,
- potreba extrémnej spoľahlivosti,
- zložitá certifikácia podľa leteckých predpisov.

Budúci vývoj smeruje k miniaturizácii, využitiu umelej inteligencie a integrácii týchto technológií do koncepcií ako U-space a Urban Air Mobility. **Legislatívne rámce a pravidlá prevádzky UAS** [4] [5].

Nariadenie Európskej únie č. 2019/947 zavádza jednotné pravidlá pre prevádzku UAS s cieľom zvýšiť bezpečnosť a podporiť ich integráciu do vzdušného priestoru. Kľúčovými princípmi sú:

- **Kategorizácia prevádzky:** rozdelenie na otvorenú, osobitnú a certifikovanú kategóriu podľa rizika.
- **Registrácia a certifikácia:** povinnosť registrácie prevádzkovateľov a certifikácie pilotov podľa kategórie.
- **Technické požiadavky:** zahŕňajú napríklad geografické ohraničenie či implementáciu Remote ID.
- **Bezpečnostné opatrenia:** dôraz na riadenie rizika, plánovanie letov a postupy pre núdzové situácie.
- **Integrácia do vzdušného priestoru:** zavádza povinnosť kompatibility so systémami ako ADS-B a U-space.

Otvorená kategória prevádzky sa ďalej delí na podkategórie A1, A2 a A3:

- **A1** – drony do 250 g, povolený let nad osobami (nie nad zhromaždením).
- **A2** – do 4 kg, vyžaduje minimálne odstupy od osôb (30 m, prípadne 5 m pri pomalom lete).
- **A3** – do 25 kg, určená pre oblasti bez ľudí, mimo obývaného územia.

Od 1. januára 2024 je navyše v špecifickej kategórii povinná **diaľková identifikácia (Remote ID)**. Zariadenia musia byť označené „Vyhlasením o zhode EÚ“, pričom zodpovednosť za súlad nesie výrobca. EASA tieto komponenty neoveruje. Tieto legislatívne kroky vytvárajú základ pre bezpečné a zodpovedné využívanie UAS v rámci jednotného európskeho vzdušného priestoru. [6] [7] [8]

2.5. Dronetag Beacon Gen. 2

Dronetag Beacon Gen. 2 je kompaktné zariadenie určené na diaľkovú identifikáciu bezpilotných lietadiel (Remote ID) v súlade s nariadeniami EÚ a USA. Je vybavené GNSS prijímačom podporujúcim systémy GPS, GLONASS, Galileo a SBAS, čo umožňuje presné určenie polohy s presnosťou do 1–3 metrov. Komunikácia prebieha prostredníctvom Bluetooth na frekvencii 2,4 GHz s dosahom do 3 km. Zariadenie obsahuje 200 mAh batériu s výdržou 10–18 hodín a dobou nabíjania cca 2 hodiny. Rozmery 37 × 26 × 16 mm a hmotnosť 17 g umožňujú jednoduchú montáž na rôzne typy UAS bez výrazného vplyvu na letové vlastnosti. Súčasťou systému je mobilná aplikácia Dronetag, ktorá poskytuje prehľad o letových parametroch a umožňuje konfiguráciu zariadenia. Vďaka svojej spoľahlivosti nachádza uplatnenie v oblastiach ako monitorovanie

infraštruktúry, doručovanie zásielok či environmentálne pozorovania [9] [10].

2.6. Aerobits TR-1F

TR-1F je ultraľahký transceiver určený na identifikáciu UAS prostredníctvom protokolov ADS-B (1090 MHz) a FLARM (868 MHz). Podporuje viaceré GNSS systémy a barometrické senzory pre presné určovanie výšky. Zariadenie má výstupný výkon ADS-B do 1 W a FLARM do 0,025 W. S rozmermi 35 × 25 × 8,5 mm a hmotnosťou 14 g patrí medzi najmenšie vo svojej kategórii. Napájanie je 5 V s priemernou spotrebou cca 130 mA. Robustné hliníkové puzdro poskytuje mechanickú ochranu a ESD odolnosť. TR-1F podporuje štandardy MAVLink a AERO a je vybavený FPGA-In-The-Loop™ technológiou pre vysokorýchlostné spracovanie údajov. Zariadenie sa využíva najmä pri sledovaní vzdušnej premávky v blízkosti letísk a ako súčasť systémov „Detect and Avoid“ pre zvýšenie bezpečnosti UAS. [11] [12]

2.7. METODIKA MERANÍ

2.7.1. MERANIA DRONETAG BEACON GEN. 2

Zariadenie Dronetag Beacon Gen. 2 bolo počas oboch meraní stacionárne umiestnené na Letisku Žilina vo výške 1 meter nad zemou vo vzdialenosti od osi dráhy 114 metrov v prostredí s voľným výhľadom nízkym elektromagnetickým rušením a bez prekážok, ktoré by mohli tieniť signál. Dronetag v tomto prípade prezentoval nízkú prevádzku UAS v blízkosti VPD.



Obrázok 1 Umiestnenie Dronetagu Beacon Gen. 2 na Letisku Žilina
Zdroj: [13]

10. Lietadlo

Lety boli realizované lietadlom Tomark Viper SD-4 RTC – slovenským dvojmiestnym ľahkým športovým lietadlom, vybaveným digitálnou avionikou. Počas letu boli vykonávané pravotočivé aj ľavotočivé okruhy okolo vysielajúceho zariadenia.



Obrázok 2 Tomark Viper SD-4 RTC
Zdroj: [14]

11. Zariadenie na detekciu signálu

Na palube lietadla bolo ako prijímacie zariadenie použité mobilné zariadenie iPhone 13, ktoré disponuje modernými Bluetooth čípmi s vysokou citlivosťou. Je však potrebné poznamenať, že výsledky by sa mohli líšiť pri starších alebo menej výkonných zariadeniach. Údaje boli získané z aplikácie DroneScanner, ktorá kontinuálne automaticky zaznamenávala údaje do súboru CSV (Comma-separated values). Súbor spolu v rámci merania obsahovali 12 022 riadkov a v každom riadku bolo uvedených 36 informácií v danom okamihu, čím bol zabezpečený dostatočne reprezentatívny vzorkovací súbor pre analýzu účinnosti detekcie signálu vysielaného zariadením.

12. Letové podmienky:

Počas oboch meraní boli vyhovujúce meteorologické podmienky – jasná obloha, minimálny vietor a bez zrážok, čo znamená optimálne prostredie pre šírenie Bluetooth signálu. Je však nutné dodať, že výsledky by sa mohli významne líšiť v prípade dažďa, hmly alebo iných atmosférických javov, ktoré absorbujú alebo rozptyľujú rádiové vlny.

13. Opis merania:

V rámci merania bola testovaná schopnosť zariadenia Dronetag Beacon Gen. 2 vysielat signál, ktorý dokáže byť zachytený mobilným prijímačom počas letovej prevádzky. Zariadenie bolo počas oboch meraní stacionárne umiestnené na Letisku Žilina, vo výške približne 1 meter nad zemou a vo vzdialenosti 114 metrov od osi vzletovej a pristávacej dráhy (VPD). Umiestnenie bolo zvolené v prostredí s voľným výhľadom, nízkym elektromagnetickým rušením a bez fyzických prekážok, ktoré by mohli tieniť signál.

Dronetag Beacon v tomto prípade simuloval reálnu prevádzku bezpilotného systému (UAS) v blízkosti aktívnej VPD, čím boli vytvorené optimálne podmienky pre testovanie detekcie v reálnom prostredí. Lety boli realizované lietadlom Tomark Viper SD-4 RTC s avionickým systémom Dynon SkyView SV-D1000, pričom na palube lietadla bolo ako prijímacie zariadenie použité mobilné zariadenie iPhone 13, umiestnené v kokpite v oblasti palubnej dosky. Počas merania boli vykonávané pravotočivé aj ľavotočivé okruhy čas 350 minút.

Metodika merania vzdialenosti

Vzdialenosť a parametre letu pri detekcii signálu boli určované nasledovným spôsobom: v okamihu zachytenia signálu zariadením iPhone 13 bolo v aplikácii DroneScanner zaznamenaných 36 údajov o stave zariadenia Dronetag Beacon Gen. 2 a našej polohy, vrátane presného času, následne bola na stránke FlightRadar24 vyhľadaná pozícia lietadla na mape, vrátane aktuálnej výšky a rýchlosti letu v čase zachytenia signálu. Tento postup umožnil presne určiť horizontálnu vzdialenosť medzi lietadlom a umiestneným zariadením Dronetag Beacon Gen. 2, a zároveň zaznamenať ďalšie letové parametre v čase zachytenia. Údaj o vzdialenosti sme následne overili pomocou výpočtu podľa Haversinovho vzorca, ktorý slúži na výpočet vzdialenosti dvoch bodov pri ich známych súradniciach. Detekčná vzdialenosť pri pravotočivých okruhoch: Maximálna horizontálna vzdialenosť, na ktorú bol v tomto prípade signál z Dronetag Beacon zachytený, dosiahol hodnotu 592 metrov. Pri rýchlosti 65 knot, ktorá je charakteristická pre daný typ lietadla pre fázu priblíženia túto vzdialenosť dosiahneme za 17,7 sekúnd. Detekčná vzdialenosť pri ľavotočivých okruhoch: V tomto prípade bola maximálna

detekčná vzdialenosť 1320 metrov. Pri rýchlosti 65 knot, ktorá je charakteristická pre daný typ lietadla pre fázu priblíženia túto vzdialenosť dosiahneme za 39,5 sekúnd.

4.2. MERANIE TR-1F

Opis zariadenia

Zariadenie TR-1F od spoločnosti Aerobits predstavuje technologicky vyspelé vysielačie a prijímacie zariadenie, ktoré kombinuje dva komunikačné štandardy – ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) a FLARM. Je navrhnutý primárne pre využitie v bezpilotných systémoch (UAS), ale aj vo všeobecnom letectve, kde je potrebné zaistiť zdieľanie polohových údajov o pohybe lietadiel.

Priebeh merania

V rámci merania bolo zariadenie TR-1F inštalované na dron DJI Matrice 300, kde bolo pevne pripevnené na rám konštrukcie UAS. Letová prevádzka prebiehala na Letisku Žilina, pričom boli realizované okružné lety v rôznych výškach nad terénom.

Počas celkového letového času 65 minút bol UAS opakovane vypúšťaný a prelietaval definované trasy, aby bolo možné sledovať viditeľnosť signálu v rôznych letových profiloch.

- Signál ADS-B bol monitorovaný prostredníctvom globálnej platformy Flightradar24, kde bolo možné UAS neustále monitorovať počas celého trvania letov. Vzhľadom na umiestnenie prijímača ADS-B pre platformu Flightradar24 na Letisku Žilina, bolo efektívne využiť na monitorovanie polohy UAS práve tento systém.
- Signál FLARM bol monitorovaný prostredníctvom služby GlideAndSeek.com, kde sa rovnako potvrdila viditeľnosť UAS, avšak s mierne obmedzeným dosahom v porovnaní s ADS-B. Vzhľadom na umiestnenie prijímača FLARM pre službu GlideAndSeek na Letisku Žilina, bolo efektívne využiť na monitorovanie polohy UAS práve túto službu.

Meteorologické podmienky počas meraní boli výborné, bez výrazného vetra a za jasnej oblohy, čo minimalizovalo vplyv atmosférických podmienok na kvalitu a dosah signálu.

Testovanie na palube lietadla

Zariadenie TR-1F bolo zároveň testované aj na palube lietadla Tomark Viper SD-4 Nihht. Cieľom bolo overiť, či je možné zachytiť jeho signál prostredníctvom palubného systému vybaveného prijímačom ADS-B integrovaným v systéme Dynon SkyView HDX SV-HDX1100

Počas letov však zariadenie TR-1F nebolo zobrazené v palubnom zobrazovacom systéme. Napriek tomu sa ukázalo, že TR-1F vysielať ADS-B signál správne, pretože bol detegovaný sekundárnym radarom letiskového systému. Tým sa potvrdilo, že problém nebol v samotnom vysielači TR-1F, ale v interpretácii a spracovaní signálu prijímacím zariadením lietadla.

3. Výsledky

3.1. Dronetag Beacon Gen. 2

Testovanie preukázalo vysokú spoľahlivosť zariadenia Dronetag Beacon Gen. 2 pri leteckej prevádzke. Dosiahnutá detekčná vzdialenosť cez 1,3 km pri výške 105 metrov potvrdzuje efektívny výkon Bluetooth prenosu aj v reálnych podmienkach. Presnosť určovania polohy, kompaktnosť, nízka hmotnosť a dlhá výdrž batérie (10–18 hodín) robia zariadenie ideálnym na integráciu do rôznych typov UAS. Zaujímavým výsledkom bol výrazný rozdiel medzi pravými a ľavými letovými okruhmi, pričom pri pravých bol detekčný dosah viac než dvojnásobný. Dôvodom môžu byť: smerová charakteristika antény, poloha prijímača a tieniace vplyvy okolia. Počas testovania bolo zachytených viac než 12 000 dátových rámcov, čo zvyšuje štatistickú dôveryhodnosť výsledkov. Zariadenie tak plne spĺňa požiadavky na Remote ID podľa európskej legislatívy.

Možnosti zlepšenia a perspektívy

Zvýšenie detekčnej vzdialenosti by mohlo byť dosiahnuté použitím modernejších prijímačov alebo zariadení s optimalizovanou anténou architektúrou.

Za zmienku stojí nová verzia – Dronetag Rider, ktorá okrem Bluetooth podporuje aj LTE a Wi-Fi, má vyššiu GNSS presnosť a je vhodná na integráciu do UTM a letiskových systémov.

Na letisku Žilina by mohol Rider slúžiť ako: monitorovacie centrum UAS s vizualizáciou na jednom zariadení, systém včasného varovania pred kolíziami, výučbová pomôcka pre pilotov a školiteľov v rámci U-space konceptu. Implementácia Dronetag Rider by významne prispela k zvýšeniu bezpečnosti pri súčasnej prevádzke pilotovaných a bezpilotných systémov.

3.2. Aerobits TR-1F

Testovanie zariadenia TR-1F na palube lietadla Tomark Viper SD-4 potvrdilo jeho schopnosť spoľahlivo vysielať signály v režimoch ADS-B a FLARM. Avšak tieto údaje neboli zobrazené v palubnej avionike, čo poukazuje na technické a legislatívne limity aktuálnej interoperability medzi UAS a pilotovanými lietadlami. Dôvodom je zrejme prednastavená filtrácia signálov palubnými ADS-B prijímačmi, ktoré často zobrazujú len komerčné/pilotované lietadlá a ignorujú UAS kódy. Ďalším obmedzením je neprítomnosť FLARM modulu v zobrazovacom systéme lietadla, čo je bežné pri športových a všeobecných lietadlách.

Možnosti riešenia

Identifikovali sa dve cesty:

Zmena konfigurácie TR-1F (typ lietadla, ICAO ID, výstupné parametre) – umožňuje, aby bol signál vnímaný ako pilotované lietadlo. Úprava filtrov v palubných systémoch – administratívne a certifikačne náročnejšia možnosť, vyžadujúca súhlas výrobcu a autorít.

Zhodnotenie zariadenia TR-1F

- vysoko spoľahlivý a flexibilný vysielač ADS-B/FLARM,

- kompaktné a energeticky nenáročné riešenie vhodné pre rôzne typy UAS,
- programovateľné zariadenie s možnosťou širokej integrácie (MAVLink, AERO).

Jeho výhodou oproti zariadeniam typu Dronetag Beacon je možnosť zobrazenia údajov priamo v pilotnom systéme, za predpokladu správnej integrácie.

Odporúčania pre budúci vývoj

- zaviesť samostatné zobrazovacie moduly pre UAS na palube lietadiel,
- prepojiť ich s TR-1F alebo podobnými zariadeniami,
- optimalizovať rozhranie na zobrazovanie výšky, ICAO ID, trajektórie a rýchlosti bezpilotných prostriedkov.

Takýto systém by výrazne zvýšil situačné povedomie pilota, umožnil včasné varovanie a pripravil infraštruktúru na budúce požiadavky U-space a digitálne riadenie zmiešanej prevádzky.

Hlavný prínos meraní

Letové testovanie na letisku Žilina potvrdilo vysokú spoľahlivosť zariadenia Dronetag Beacon Gen. 2 pri zabezpečení viditeľnosti UAS v prostredí výcvikovej a riadenej prevádzky. Zariadenie bolo schopné stabilne vyslať svoju polohu vo výškach nad 100 metrov, pričom bolo zachytených viac než 12 000 dátových bodov – dostatočný objem pre relevantnú štatistickú analýzu. Detekcia v reálnom čase a presná lokalizácia výrazne zvyšujú situačné povedomie pilotov a umožňujú včasné rozhodovanie pri hroziacich konfliktných situáciách. V prostredí zmiešanej prevádzky, typickej pre malé letiská ako Žilina, predstavuje Dronetag Beacon jednoduché a efektívne riešenie, ktoré napomáha znižovaniu rizika kolízií. Súčasne sa ukazuje význam centrálného monitorovacieho systému na úrovni letiskovej infraštruktúry, ktorý by umožnil sledovanie všetkých aktívnych UAS. Takéto riešenie by mohlo slúžiť dispečerom aj inštruktorm ako nástroj pre prevenciu incidentov a zlepšenie koordinácie. Zavedenie systémov aktívnej identifikácie a ich začlenenie do výučby študentov leteckých odborov by pripravilo personál na prácu v modernom leteckom prostredí. Letisko Žilina sa tak môže stať modelovým príkladom implementácie technológie Remote ID a slúžiť ako inšpirácia pre ďalšie regionálne letiská.

4. Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo komplexne preskúmať možnosti a aspekty integrácie bezpilotných leteckých systémov (UAS) do existujúceho systému leteckej dopravy, so špecifickým dôrazom na protizrážkové systémy. V teoretickej časti bola spracovaná podrobná literárna rešerš zameraná na vývoj, funkčnosť a implementáciu kľúčových systémov ako sú TCAS, ACAS, ADS-B, FLARM, ako aj na integrované systémy riadenia letovej prevádzky. Pozornosť bola venovaná aj špecifickým riešeniam v oblasti UAS – ich senzorickým systémom, technickým obmedzeniam a platnej legislatíve, vrátane Nariadenia (EÚ) 2019/947. Praktická časť práce bola zameraná na experimentálne overenie efektívnosti identifikačných zariadení pre UAS. Pomocou zariadenia Dronetag Beacon Gen. 2 boli vykonané merania, ktoré preukázali spoľahlivosť

vysielaného Bluetooth signálu a jeho efektívnu detekciu počas letových. Získané údaje (viac ako 12023 dátových bodov) umožnili kvantitatívne zhodnotiť výkon zariadenia a potvrdiť jeho vhodnosť pre implementáciu Remote ID v súlade s legislatívou EÚ. Ďalším analyzovaným systémom bol vysielacia Aerobits TR-1F, využívajúci FLARM a ADS-B. V praxi sa ukázalo, že jeho integrácia do palubného systému lietadla Tomark Viper SD-4 Night narážala na obmedzenia vyplývajúce z predvolených konfiguračných parametrov (profil UAS), ktoré boli filtrované palubnou avionikou. Napriek tomu bol signál úspešne detekovaný monitorovacími systémami, čo potvrdzuje spoľahlivú vysielaciu schopnosť zariadenia. Zároveň sa otvorila diskusia o možnostiach budúcej integrácie samostatného zobrazovacieho rozhrania pre UAS do palubného vybavenia pilotovaných lietadiel – ako reakcia na rastúci objem prevádzky UAS a požiadavky na vyššiu úroveň situačného povedomia. Výsledky práce ukazujú, že efektívna integrácia bezpilotných systémov do vzdušného priestoru vyžaduje nielen spoľahlivé technické riešenia, ale aj systémové prispôbenie palubných a pozemných technológií, ako aj legislatívnu a regulačnú podporu. Pokrok v oblasti senzorických technológií, umelej inteligencie a štandardov vzájomnej kompatibility vytvára základ pre jednotný, prepojený a bezpečný letecký ekosystém, v ktorom budú môcť pilotované aj bezpilotné systémy fungovať vedľa seba.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu 313011ATR9 "Výskum a vývoj využiteľnosti autonómnych lietajúcich prostriedkov v boji proti pandémie spôsobenej COVID-19".

Referencie

- [1] SKYbrary (2023). UAS Remote Identification. Online. In: SKYbrary. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/uas-remote-identification>. [citované 2025-03-10].
- [2] R. V. - V. P. a B. Development (2023). Network Remote ID and the Future of Drone Operations. Online. In: elsight.com. Dostupné na: <https://www.elsight.com/blog/network-remote-id-and-the-future-of-drone-operations/>. [citované 2025-03-10].
- [3] Eudroneport.com (2023). Direct Remote Identification (DRI). Online. In: Eudroneport.com. Dostupné na: <https://eudroneport.com/blog/dri-systems/>. [citované 2025-03-18].
- [4] MILLER, S. (2019). Innovations in UAS Technology. UAS Tech Journal, roč. 12, č. 1, s. 30–44.
- [5] SKYbrary Aviation Safety (2024). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Collision Avoidance Systems. Online. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/accident-and-serious-incident-reports-uas>. [citované 2025-03-25].
- [6] Európska únia – Digital Single Market (2024). Online. Dostupné na: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/>. [citované 2025-03-25].
- [7] ANDERSON, J. (2019). Collision Avoidance in UAV Systems. Journal of Unmanned Systems, roč. 8, č. 3, s. 112–127.

- [8] KUMAR, R. a SINGH, P. (2021). Sensor Fusion in UAV Collision Avoidance. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, roč. 57, č. 4, s. 2000–2010.
- [9] DRONETAG Help Center (2024). Technical specification of Dronetag Beacon Gen.2. Online. Dostupné na: <https://help.dronetag.cz/dronetag-beacon-gen2/specification/>. [citované 2025-03-22].
- [10] Crutchfield (2024). Dronetag Beacon Gen. 2 product details and specifications. Online. Dostupné na: https://www.crutchfield.com/p_354BCNV2/Dronetag-Beacon-Gen-2.html. [citované 2025-03-22].
- [11] Aerobits (2024). TR-1F – Official Product Page. Online. Dostupné na: <https://www.aerobits.pl/product/tr-1f/>. [citované 2025-01-13].
- [12] Aerobits (2024). TR-1F Datasheet. Online. Dostupné na: https://www.aerobits.pl/wp-content/uploads/ci_uploads_software/tr_1f/technical_documentation/PP_TR-1F_Datasheet_22t-v1_1_58.pdf. [citované 2025-03-18].
- [13] Google Earth (2025). Zobrazenie lokality: Žilina a okolie. Online. Dostupné na: <https://earth.google.com/web/>. [citované 2025-04-20].
- [14] Katedra leteckej dopravy, Žilinská univerzita v Žiline (2020). Katedra leteckej dopravy UNIZA. Online. Dostupné na: <https://kld.uniza.sk/sk/>. [citované 2025-04-20].



RIEŠENIE VÝPADKU SYSTÉMU A NEDOSTATKU PERSONÁLU PRI ODBAVOVANÍ CESTUJÚCICH NA LETISKÁCH

Sebastián Valo
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Ján Rostáš
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

With the growing volume of air transport, airports are increasingly dependent on digital check-in systems and the availability of qualified personnel. System outages and staff shortages represent two key challenges that negatively affect the efficiency and fluency of the passenger handling process at airports. This article analyses the current situation at selected airports in Slovakia and the Czech republic, evaluates the causes and consequences of these issues, and proposes concrete solutions, including organizational, technical, and staffing measures. Research results, based on surveys and interviews, highlight the needed for greater airport preparedness for unexpected situations and emphasize the importance of technological modernization.

Keywords

System outage, staff shortage, check-in, passenger handling, airports, digitalization

1. Úvod

Letiská ako kritická infraštruktúra globálnej dopravy čelia v posledných rokoch rastúcemu tlaku na efektívnosť, bezpečnosť a spoľahlivosť služieb. Jedným z najzávažnejších problémov, ktorým musia čeliť, sú výpadky odbavovacích systémov a nedostatok personálu. Tieto faktory môžu spôsobiť výrazné zdržania, meškania letov a dokonca ohroziť bezpečnosť leteckej prevádzky.

Výpadky IT systémov sú čoraz častejšie v dôsledku zložitej infraštruktúry, kybernetických hrozieb a nedostatočného zálohovania. Zároveň sa prehľbuje problém nedostatku kvalifikovaného personálu, ktorý je ovplyvnený sezónnosťou, fluktuáciou zamestnancov, ale aj následkami kríz ako bola pandémia COVID-19. Cieľom tohto článku je identifikovať hlavné príčiny týchto problémov, analyzovať ich dopad na prevádzku letísk a navrhnúť konkrétne riešenia, ktoré by mohli pomôcť zvýšiť odolnosť a efektívnosť odbavovacích procesov.

2. Metodika a metódy skúmania

Na účely spracovania problematiky bola zvolená kombinácia kvalitatívnych a kvantitatívnych výskumných metód. V prvej fáze výskumu bola realizovaná analýza dostupnej literatúry, ktorá poskytla teoretický základ pre pochopenie odbavovacích procesov, informačných systémov a bezpečnostných výziev súvisiacich s odbavením cestujúcich.

Nasledovala fáza zberu primárnych údajov prostredníctvom dotazníkov a osobných rozhovorov s odborníkmi z vybraných letísk na Slovensku a v Českej republike. Konkrétne boli zapojené letiská v Bratislave, Košiciach, Prahe, Ostrave a Brne. Zber dát prebiehal od januára do marca 2025. Respondenti poskytli hodnotné informácie o výskyte výpadkov systémov a o skúsenostiach s nedostatkom personálu.

Získané dáta boli analyzované pomocou metód SWOT a SHELL analýzy, ktoré umožnili identifikovať silné a slabé stránky, ako aj

príležitosti a hrozby v rámci riadenia odbavovacieho procesu. Pre doplnenie kontextu boli do hodnotenia zahrnuté aj externé faktory pomocou PESTLE analýzy.

3. Výsledky

Na základe zberu údajov z piatich vybraných letísk v Slovenskej a Českej republike boli vyhodnotené dopady výpadkov systémov a nedostatku personálu na odbavovací proces.

3.1 Vyhodnotenie výpadku systému na vybraných letiskách

Globálny výpadok odbavovacieho systému GoNow, spôsobený technickými problémami na strane jeho prevádzkovateľa, ovplyvnil viacero nízkonákladových leteckých spoločností – napríklad Ryanair, Wizz Air, Eurowings, Vueling či Transavia. Keďže väčšina slovenských a českých regionálnych letísk obsluhuje najmä Ryanair, dopad výpadku bol na nich relatívne malý, pretože sa prešlo na manuálne odbavenie. Najvýraznejšie postihnutým letiskom v regióne bolo Letisko Václava Havla v Prahe, kde používajú GoNow viacerí dopravcovia. V dôsledku toho došlo k rozsiahlym meškaniam, preťaženiu systému a dokonca k zrušeniu niektorých letov.

Počas výpadku všetky dotknuté letiská prešli na manuálny režim odbavovania. Tento proces je výrazne pomalší a zvyšuje pracovnú záťaž zamestnancov check-inu. Niektoré letiská dokázali dočasne odbavovať cestujúcich cez vlastný interný systém, pokiaľ mali vopred nahraté údaje z externého systému. V prípade, že by došlo k výpadku aj tohto hlavného systému, letisko by bolo prakticky paralyzované.

Na menších regionálnych letiskách sa meškania pohybovali v desiatkach minút, zväčša v dôsledku spomaleného procesu check-inu a nakládky batožiny. V Prahe boli dôsledky omnoho výraznejšie – meškania dosahovali niekoľko hodín, keďže pre veľký počet letov nebolo možné zabezpečiť manuálne odbavenie všetkých cestujúcich. Kapacitné možnosti pozemného personálu boli prekročené.

Výpadok ovplyvnil aj ďalšie činnosti letiskovej prevádzky – spomalenie check-inu spôsobilo oneskorenú manipuláciu s batožinou a kumuláciu lietadiel na stojiskách, čo ešte viac zhoršilo situáciu.

Z pohľadu prevencie je dôležité, aby mali letiská vypracované núdzové scenáre a štandardizované postupy. Napríklad Ryanair vyžaduje, aby boli na každom letisku, ktoré obsluhuje, pravidelne manuálne odbavené aspoň tri lety mesačne. Tento postup slúži na precvičenie personálu a pripravenosť v prípade výpadku.

Niektoré letiská už zavádzajú možnosť používať svoj hlavný odbavovací systém ako záložný pre prípad zlyhania externého systému. Na menších letiskách postačuje manuálne odbavovanie, no na veľkých letiskách, ako je Praha, je takýto spôsob prakticky nerealizovateľný.

3.2 Vyhodnotenie nedostatku personálu na vybraných letiskách

Nedostatok personálu predstavuje dlhodobu pretrvávajúci problém na mnohých letiskách, a to nielen v dôsledku pandémie COVID-19, počas ktorej došlo k výraznému zníženiu stavov zamestnancov. Situáciu komplikuje aj každoročný nárast počtu cestujúcich, ktorý zvyšuje nároky na kapacity letiskovej infraštruktúry aj personálu. Najväčšie výkyvy sa pozorujú najmä počas letnej sezóny, keď sa dramaticky zvyšuje objem prevádzky. Letiská preto musia operatívne reagovať na sezónne výkyvy a zabezpečiť dostatočný počet pracovníkov v kľúčových oblastiach prevádzky.

Jednou z hlavných príčin nedostatku zamestnancov je práve sezónna vyťaženosť, sprevádzaná častou fluktuáciou. Nábor nových zamestnancov je časovo náročný – kandidáti musia získať bezpečnostnú previerku, čo môže trvať aj dva mesiace. Počas tejto doby nemajú prístup do verejných častí letiska (tzv. airside), a teda nemôžu plnohodnotne vykonávať svoju prácu. Ak zamestnanec po krátkom čase pracovný pomer ukončí, celý proces sa musí opakovať, čo výrazne znižuje personálnu stabilitu.

Najvýraznejší nedostatok je dlhodobu evidovaný v oblasti nákladky a vykládky batožiny, kde je práca fyzicky náročná, často v exteriérových podmienkach, a o túto pozíciu nie je veľký záujem. Problémy sa však vyskytujú aj pri obsadzovaní pozícií na check-ine, v bezpečnostnej kontrole či v oblasti údržby a upratovania. V mnohých prípadoch sú tieto pozície viazané na špecifické školenia, licencie alebo oprávnenia – napríklad vodiči autobusov a obsluhovači nástupných mostov musia absolvovať osobitné kurzy a preukázať odbornú spôsobilosť. To výrazne limituje flexibilitu zamestnávania a zvyšuje nároky na náborový proces.

Na preklenutie krátkodobých personálnych výpadkov využívajú letiská rôzne krízové riešenia. Bežnou praxou je dočasné presúvanie zamestnancov z iných oddelení, napríklad administratívny alebo záchranných zložiek. Títo zamestnanci môžu vypomáhať pri menej kvalifikovaných činnostiach, ako je napríklad manipulácia s batožinou, no nemožno ich nasadiť na odborné pozície, ktoré vyžadujú špecializáciu alebo bezpečnostnú previerku. Ďalším riešením je využívanie nadčasov u kmeňových pracovníkov. Hoci to krátkodobo zmierni

nedostatok, z dlhodobého hľadiska môže viesť k preťaženiu, zníženiu spokojnosti a ďalšiemu odchodu pracovníkov.

Pre sezónne posilnenie prevádzky letiská najčastejšie siahajú po brigádnikoch, ktorí pracujú na dohodu o vykonaní práce. Ich nábor sa začína už v predjarí – najčastejšie v marci – aby sa stihlo vybaviť všetky potrebné formality, ako je bezpečnostná previerka či odborné zaškolenie. Títo zamestnanci sú potom plne pripravení na nasadenie počas najvyťaženejších letných mesiacov. V prípade potreby ostávajú niektorí brigádnicovia aktívni aj počas zimnej sezóny – napríklad pri otvorení nových zimných liniek alebo pri zabezpečovaní zimnej údržby letiska. V takýchto prípadoch nie je nutné znova školenie nových pracovníkov, čím sa znižujú náklady a časová náročnosť personálnych procesov.

Celkovo možno konštatovať, že nedostatok personálu predstavuje závažný faktor ovplyvňujúci plynulosť a kvalitu odbavovacích procesov. Letiská musia preto disponovať flexibilnými plánmi personálneho zabezpečenia, investovať do školení a zvyšovania kvalifikácie, ako aj do vytvárania atraktívnych podmienok pre zamestnancov s cieľom znížiť fluktuáciu a zvýšiť stabilitu pracovnej sily.

3.3 SWOT a SHELL analýza

SWOT analýza identifikovala medzi silnými stránkami najmä prítomnosť záložných systémov, skúsený personál a IT podporu. Ako slabé stránky sa ukázali dlhé školenia, preťaženie technických kapacít a zastarané technológie. Príležitosti predstavuje možnosť investícií do automatizácie a nábor sezónnych pracovníkov, hrozby súvisia najmä s reputáciou letiska a možnými bezpečnostnými rizikami pri preťažení personálu. SHELL analýza poukázala na potrebu zlepšenia softvérových a hardvérových opatrení, vrátane implementácie záložných systémov, zavedenia presných postupov pri výpadku a posilnenia infraštruktúry. Z hľadiska prostredia a živého personálu bolo dôležité zdôrazniť potrebu zrozumiteľnej komunikácie, školení a koordinácie medzi jednotlivými článkami odbavovacieho reťazca.

Silné stránky	Slabé stránky
Záložný systém, manuálne odbavenie Skúsený personál Automatizované procesy Možnosť dočasného presunu zamestnancov Nepretržitá IT podpora	Nedostatok personálu v kľúčových oblastiach Dlhá doba školenia zamestnancov Oneskorenie odbavovacieho procesu Dlhé čakacie doby pre cestujúcich Preťaženie technických kapacít letiska Zastarané technológie
Príležitosti	Hrozby
Zavedenie záložných odbavovacích systémov Nábor sezónnych zamestnancov s predstihom Pravidelné školenia zamestnancov na krízové situácie Väčšie investície do IT infraštruktúry Automatizácia niektorých úkonov	Totálny výpadok odbavovacieho systému Nespokojnosť cestujúcich Zvyšujúca sa fluktuácia zamestnancov Finančné straty Ohrozenie bezpečnostnej ochrany (security)

3.4 Externé faktory a PESTLE analýza

Prevádzka letiska je ovplyvňovaná nielen internými, ale aj externými faktormi, ktoré nemožno priamo ovplyvniť a často majú negatívny dopad na plynulosť odbavovania cestujúcich. Na ich identifikáciu bola v práci aplikovaná PESTLE analýza, ktorá zohľadňuje politické, ekonomické, sociálne, technologické, legislatívne a environmentálne vplyvy.

Ako najvýraznejší ekonomicko-sociálny faktor bola vyhodnotená pandémia COVID-19, ktorá spôsobila výrazné narušenie pracovného trhu. Počas obmedzení došlo k hromadnému prepúšťaniu, čo po opätovnom oživení leteckej dopravy spôsobilo akútny nedostatok kvalifikovaného personálu. Problémom nebol len samotný počet zamestnancov, ale aj

strata ich kvalifikácie. Technologickými faktormi sú napríklad narastajúce požiadavky na bezpečnostné IT systémy a potreba zavádzania samoobslužných technológií. Z pohľadu legislatívy ide o vplyv predpisov, ktoré upravujú ochranu údajov, bezpečnostné štandardy a prevádzkové pravidlá. Environmentálne faktory súvisia najmä s tlakom na znižovanie uhlíkovej stopy a zefektívnenie energetickej náročnosti systémov.

4. Návrhy riešení

Na základe analýzy výpadkov systémov a nedostatku personálu boli navrhnuté konkrétne opatrenia, ktoré majú za cieľ zvýšiť odolnosť letísk voči týmto problémom a minimalizovať ich prevádzkové, bezpečnostné a ekonomické dopady. Tieto návrhy boli spracované s ohľadom na časový horizont a možné implementačné možnosti, ako aj s využitím SHELL analýzy na lepšie porozumenie vzťahov medzi jednotlivými komponentmi systému.

4.1 Nápravné opatrenia pri výpadku odbavovacieho systému

Z hľadiska systémovej pripravenosti je kľúčové, aby letiská zaviedli záložné odbavovacie systémy a zabezpečili ich plnú funkčnosť aj pri výpadku hlavného systému. V prípade veľkých letísk sa odporúča využívať tzv. zrkadlové systémy, ktoré v reálnom čase kopírujú údaje z hlavného systému do vzdialeného záložného úložiska. Tieto systémy by mali byť schopné okamžite prevziať prevádzku bez narušenia kontinuity odbavovania.

Dôležitým nástrojom je aj centralizovaná databáza s údajmi o cestujúcich, ktorá môže nahradiť potrebu opakovaného získavania údajov od leteckých dopravcov v prípade výpadku. Tieto opatrenia by mali byť zakotvené v manuáli núdzových opatrení (Emergency Response Manual), ktorý bude jasne určovať kompetencie a postupy v prípade výpadku systému.

Zo softvérového hľadiska je nevyhnutné pravidelne školenie personálu v oblasti manuálneho odbavovania. Príkladom dobrej praxe je požiadavka leteckej spoločnosti Ryanair, aby každý pracovník check-inu pravidelne absolvoval odbavenie niekoľkých letov manuálne. Tento postup pomáha obnovovať praktické zručnosti a pripravuje zamestnancov na možné výpadky.

V oblasti hardvéru sa odporúča, aby letiská disponovali záložnými pracoviskami so základným vybavením na manuálne odbavenie, ako aj funkčnou infraštruktúrou pre záložný systém vrátane oddelených serverov a dátových úložísk.

4.2 Nápravné opatrenia pri nedostatku personálu

Na riešenie nedostatku personálu sa odporúča vytvoriť flexibilný plán rozdelenia pracovníkov podľa vyťaženia letiska. Zamestnanci by mali byť rozdelení tak, aby bolo zabezpečené pokrytie najkritickejších časových úsekov – najmä tzv. „peak hours“. Letiská by zároveň mali vytvoriť internú personálnu rezervu, ktorá by bola schopná operatívne zasiahnuť v prípade výpadku personálu z dôvodu choroby alebo nepredvídateľných udalostí.

Významným nástrojom môže byť spolupráca s personálnymi agentúrami, ktoré zabezpečia vyškolených pracovníkov s

platnými bezpečnostnými previerkami. Títo zamestnanci môžu byť flexibilne nasadení podľa potreby a výrazne pomáhajú preklenúť sezónne výkyvy, najmä počas letnej sezóny.

Z dlhodobého hľadiska je kľúčové investovať do automatizácie procesov – napríklad zavedením samoobslužných kioskov (self check-in, self bag drop), ktoré znižujú potrebu obsluhy pri štandardných úkonoch a zároveň urýchľujú odbavovací proces. V prípade, že je k dispozícii menej personálu, tieto technológie zabezpečia kontinuitu služieb a zlepšia celkovú efektivitu.

Z hľadiska plánovania by letiská mali vytvárať personálne plány založené na dátovej analýze prevádzkových špičiek a typických denných cyklov. Riešením môže byť aj práca na dohodu počas kritických období alebo čiastočné úväzky pre študentov a dôchodcov.

4.3 SHELL analýza ako podpora návrhov

Na komplexné zhodnotenie návrhov nápravných opatrení pri výpadku odbavovacieho systému sa využíva SHELL analýza, ktorá hodnotí vzájomné interakcie medzi piatimi kľúčovými oblasťami: Software(systémy), Hardware (zariadenia), Environment (prostredie), Liveware (človek ako jednotlivec) a Liveware (interakcia medzi ľuďmi). Cieľom tejto analýzy je identifikovať možné riziká a navrhnúť opatrenia, ktoré zvýšia bezpečnosť a efektivitu pri výpadku odbavovacích systémov.

V oblasti **software** je dôležité zaviesť jasné postupy na zvládanie výpadkov systému, ktoré budú súčasťou Emergency Response manuálu letiska. Kľúčovým opatrením je aj implementácia záložných technológií – napríklad tzv. zrkadlových systémov a vzdialeného úložiska dát, ktoré umožnia rýchly prechod na záložné riešenie v prípade výpadku. Centralizovaná databáza by mala slúžiť ako úložisko kľúčových údajov o cestujúcich, čím sa predíde potrebe kontaktovať dopravcov za účelom získania týchto informácií počas krízovej situácie.

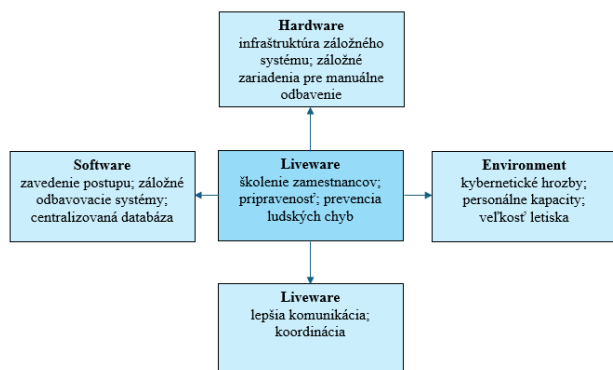
Pokiaľ ide o **hardware**, je nevyhnutné vybudovať dostatočnú technickú infraštruktúru pre fungovanie záložných odbavovacích systémov. Zahŕňa to aj dostupnosť potrebných zariadení, ako sú tlačiarne na palubné lístky a batožinové štítky, ktoré umožnia manuálne odbavenie cestujúcich v prípade výpadku automatizovaných systémov.

V kategórii **environment**, teda prostredia, je potrebné počítať so zvyšujúcim sa rizikom kybernetických útokov, ktoré môžu ovplyvniť integritu a bezpečnosť systémov. Ochrana záložných systémov pred týmito hrozbami je kľúčová. Okrem toho je dôležité zabezpečiť dostatočný počet kvalifikovaného personálu, ktorý bude pripravený okamžite prejsť na manuálne procesy. Pri zohľadnení rozdielov medzi letiskami treba počítať s tým, že menšie letiská zvládnu manuálny režim jednoduchšie, zatiaľ čo väčšie budú vyžadovať automatizované riešenia s vyššou kapacitou.

V časti **Liveware** (človek ako jednotlivec) zohráva kľúčovú úlohu pravidelné školenie zamestnancov. Príprava personálu na manuálne odbavenie zaručí, že v prípade výpadku bude proces prebiehať plynule a bez zbytočných časových strát. Okrem samotného školenia je dôležitá aj pripravenosť zamestnancov na krízové situácie a schopnosť rýchlo a správne reagovať. Prevencia ľudských chýb by mala byť zabezpečená formou

praktických cvičení, ako napríklad manuálne odbavenie troch liniek za pol roka, čo pomôže udržiavať nadobudnuté zručnosti.

Napokon, oblasť **Liveware – interakcia medzi ľuďmi** zahŕňa zlepšenie komunikácie medzi letiskovým personálom, IT oddelením a leteckými spoločnosťami. Rovnako dôležitá je koordinácia s dopravcami, najmä pri potrebe získania zoznamu cestujúcich v prípade prechodu na alternatívny spôsob odbavenia. Efektívna výmena informácií a vzájomná spolupráca sú kľúčové pre zvládnutie krízových situácií bez výrazných výpadkov alebo oneskorení.



5. Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo zhodnotiť súčasné systémy a procesy pri odbavovaní cestujúcich na letiskách a navrhnúť riešenia v prípade opakovaných výpadkov odbavovacieho systému. Venovali sme sa najmä problému nedostatku personálu a poruchám systémov, pričom sme analyzovali právny rámec, časti odbavovacieho procesu a súvisiace technológie vrátane ochrany pred kybernetickými útokmi.

V praktickej časti sme skúmali interné a externé faktory ovplyvňujúce odbavenie, pričom sme využili údaje z rozhovorov a dotazníkov zo slovenských a českých letísk. Výsledky sme spracovali do SWOT analýzy a navrhli konkrétne opatrenia na zmiernenie dôsledkov výpadkov systémov a nedostatku personálu. Návrhy sú zhrnuté v SHELL analýze, ktorá pomáha lepšie pochopiť interakcie medzi ľuďmi, technológiami a prostredím pri krízových situáciách.

Na základe zistení sme identifikovali ako hlavnú príčinu výpadku v roku 2024 technické problémy na strane poskytovateľa systému. Väčšina letísk nebola vybavená záložnými riešeniami a bola nútená prejsť na manuálne odbavenie, na ktoré pracovníci neboli dostatočne pripravení. Ako efektívna taktika sa ukázala byť prax spoločnosti Ryanair, kde zamestnanci pravidelne trénujú manuálne odbavenie troch letov mesačne, čím sa znižuje riziko chýb v krízových situáciách.

Pre lepšiu odolnosť letísk odporúčame zavedenie alternatívnych záložných systémov s pravidelným zálohovaním dát v centralizovanej databáze fungujúcej ako zrkadlový systém. Tým sa zabezpečí plynulý prechod pri výpadku hlavného systému bez potreby kontaktovať dopravcu kvôli údajom o cestujúcich.

Riešenie nedostatku personálu spočíva v spolupráci s personálnymi agentúrami, ktoré môžu dodať vyškolených pracovníkov v prípade potreby, najmä počas sezónnych špičiek. Dôležité je aj efektívne rozdelenie zamestnancov počas služieb

a včasné plánovanie náboru. Z dlhodobého hľadiska odporúčame zavádzať automatizované riešenia ako samoobslužné kiosky či self bag drop, ktoré znižujú záťaž na personál a zrychlujú odbavovací proces.

Záverom možno konštatovať, že pripravenosť na výpadky systémov je kľúčová pre zachovanie plynulej prevádzky letiska. Kým menšie letiská zvládali výpadky lepšie vďaka menšiemu počtu cestujúcich, väčšie letiská boli na tieto situácie horšie pripravené. Vzhľadom na ich vysokú vyťaženosť je nevyhnutné inovovať technológie aj procesy. Podobne je potrebné aktívne riešiť nedostatok personálu prostredníctvom plánovania, automatizácie a spolupráce s externými zdrojmi.

Referencie

VALO, Sebastián, Bc: Riešenie výpadku systému a nedostatku personálu pri odbavovaní cestujúcich na letiskách [Diplomová práca]. Žilinská univerzita v Žiline. Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov; Katedra leteckej dopravy. Vedúci diplomovej práce: Ing. Ján Rostáš, PhD.; Stupeň odbornej kvalifikácie: Inžinier. Žilina: FPEDAS, ŽU, 2025. 80 s.



DOPADY EMISNÝCH SYSTÉMOV NA LETECKÉ SPOLOČNOSTI

Ján Veľický
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Andrej Novák
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This paper analyses the impact of emission systems on airline operations, with emphasis on EU measures (ETS, ReFuelEU) and global mechanisms (CORSIA). It compares regulatory frameworks, technological options and airline strategies in the context of reducing emissions by 2050. A combination of methods was used, including qualitative analysis of documents, scenario comparisons (LTAG), and quantitative assessment of economic effects. The findings show that EU tools alone are insufficient without additional measures. The thesis proposes a combined approach that integrates technological, operational and behavioral components, including fuel diversification, compensation schemes and innovative policies. The result is a realistic strategy for the decarbonization of European aviation, aligned with long-term targets and taking into account SAF, hydrogen, and infrastructure risks. The objective of the thesis to propose an effective decarbonization trajectory while minimizing financial impacts on carriers was achieved.

Keywords

Emission systems, EU ETS, CORSIA, SAF, ReFuelEU

1. Úvod

Toto desaťročie sa ukazuje ako kľúčové k riešeniu výzvy globálneho otepľovania ktoré sužuje celý svet. V rokoch 2023 a 2024 boli na celom svete zaznamenané extrémne teplotné rekordy, sprevádzané pokračujúcimi trendmi klimatickej zmeny, ktoré výrazne ovplyvňujú našu planétu. Letecká doprava je emisne najrýchlejšie rastúci segmentov dopravy. V čase prehľbujúcej sa klimatickej krízy sa medzinárodné aj európske inštitúcie usilujú o zavedenie účinných emisných politík, ktoré by smerovali k uhlíkovej neutralite v tomto sektore do roku 2050. Dekarbonizačné opatrenia ako CORSIA, EU ETS či ReFuelEU Aviation sa postupne stávajú základnými nástrojmi na dosiahnutie týchto cieľov. Tieto systémy prinášajú nielen ekologické, ale aj výrazné ekonomické dopady na prevádzku leteckých spoločností, ktoré sú nútené adaptovať sa na nové podmienky, investovať do udržateľných palív, technológií a meniť svoje prevádzkové stratégie. Diplomová práca sa zaoberá syntézou realistické stratégie, ktoré by umožnili dekarbonizáciu letectva bez ohrozenia jeho ekonomickej udržateľnosti. Ďalším cieľom je posúdiť efektívnosť aktuálnych politík, identifikovať ich nedostatky. Práca využíva kombináciu kvalitatívnych a kvantitatívnych metód vrátane scenárov, ekonomických modelov a analýzy správania hlavných aktérov v sektore. Základným predpokladom je presvedčenie, že len systémový a integrovaný prístup môže zabezpečiť zníženie emisií v súlade s dlhodobými klimatickými cieľmi pri zachovaní konkurencieschopnosti leteckého odvetvia.

2. ANALÝZA ZNIŽOVANIA EMISIÍ V LETECKEJ DOPRAVE DO ROKU 2050 VO SVETE

Letecká doprava patrí medzi najrýchlejšie rastúce zdroje emisií skleníkových plynov, čo predstavuje vážnu výzvu v kontexte globálneho boja proti zmene klímy [1]. Medzinárodné letectvo nebolo priamo zahrnuté do Parížskej dohody z roku 2015, pričom zodpovednosť za riešenie jeho emisií bola delegovaná na

Medzinárodnú organizáciu pre civilné letectvo (ICAO) [2]. Napriek tomu celosvetové ciele vyplývajúce z Rámcového dohovoru OSN o zmene klímy (UNFCCC), najmä udržať nárast globálnej teploty pod 1,5 °C, implicitne vyžadujú dosiahnutie čistých nulových emisií do roku 2050 aj v sektore letectva [3]. Tlak na dekarbonizáciu odvetvia viedol k prijatiu viacerých iniciatív na medzinárodnej aj regionálnej úrovni. Táto kapitola preto analyzuje hlavné programy a iniciatívy zamerané na znižovanie emisií v letectve do roku 2050, vrátane globálneho systému kompenzácií CORSIA, ako aj Európskej zelenej dohody, smernice o obnoviteľnej energii (RED) a nariadenia ReFuelEU Aviation. Pre každý z týchto nástrojov sú rozobraté ich ciele k roku 2050, spôsob fungovania, dosiahnutý pokrok a význam pre znižovanie emisií v letectve na globálnej či regionálnej úrovni.

2.1. CORSIA – Globálny systém kompenzácií a znižovania emisií uhlíka pre medzinárodné letectvo

Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, známy ako CORSIA, je prvý celosvetový mechanizmus zameraný na obmedzenie emisií v medzinárodnom letectve [4]. Krátkodobým cieľom CORSIA je dosiahnuť uhlíkovo neutrálny rast od roku 2020, t. j. zabezpečiť, aby čisté emisie z medzinárodných letov neprekročili úroveň roku 2020 [2]. Tento koncept „carbon neutral growth 2020“ schválilo valné zhromaždenie ICAO už v roku 2013 ako strednodobú aspiráciu [2]. Hoci samotné CORSIA je navrhnuté ako dočasné opatrenie do roku 2035, dlhodobá vízia ICAO počíta s dosiahnutím čistých nulových emisií medzinárodného letectva do roku 2050, čo členské štáty ICAO oficiálne prijali v roku 2022 [5] [6]. CORSIA je teda vnímaná ako jeden z pilierov na ceste k cieľu 2050, dopĺňajúci iné opatrenia (technologické inovácie, udržateľné palivá atď.) kým sa dosiahne úplná dekarbonizácia [4].

2.1.1. Spôsob fungovania:

CORSIA funguje na báze kompenzácie emisií. Kompenzácia znamená zaplatenie za zníženie emisií inde. Letecké spoločnosti musia monitorovať svoje emisie CO₂ na medzinárodných letoch a za emisie presahujúce stanovený referenčný základ nakupovať uhlíkové kredity z projektov znižovania emisií mimo sektora letectva [7]. Referenčnou hodnotou bol pôvodne priemer emisií rokov 2019–2020, no vzhľadom na pandémiu COVID-19 bol základ upravený na 85% emisií roku 2019 [8]. To znamená, že aerolínie majú povinnosť kompenzovať rast emisií len v rozsahu, ktorý prevyšuje 85% úrovne 2019, čím sa zohľadnil bezprecedentný pokles emisií počas pandémie. Samotná implementácia CORSIA prebieha v troch fázach: pilotná fáza (2021–2023), 1. fáza (2024–2026) – obe na báze dobrovoľnej účasti štátov, a 2. fáza (2027–2035), v ktorej je účasť povinná pre všetky štáty spĺňajúce stanovené kritériá [7] [8]. V pilotnej a prvej fáze musia emisie kompenzovať len lety medzi štátmi, ktoré sa do CORSIA dobrovoľne prihlásili. Od roku 2027 sa povinnosť rozšíri na všetky medzinárodné lety, s výnimkou letov do/z najmenších a najmenej rozvinutých krajín (LDC, SIDS, atď.), pokiaľ sa tieto štáty nerozhodnú pripojiť dobrovoľne [7]. CORSIA tak vytvára jednotný celosvetový rámec namiesto mozaiky rôznych regionálnych opatrení, čím zabraňuje tzv. carbon leakage a zabezpečuje rovnaké podmienky pre aerolínie po celom svete [2].

2.1.2. Dosiahnutý pokrok:

Do mechanizmu CORSIA sa zapojila drvivá väčšina krajín sveta. V pilotnej fáze sa do podávania správ o emisiách zapojilo cez 100 štátov vrátane všetkých hlavných leteckých trhov [9]. Podľa údajov ICAO za rok 2023 do CORSIA reportovalo emisie 121 štátov, čo pokrýva až 99% celkových emisií medzinárodného letectva [7]. Prvé roky fungovania systému (2021–2023) neprinesli povinnosť kompenzácií – globálne emisie zostali pod úrovňou referenčnej hodnoty v dôsledku pandémie, takže rastový faktor bol nulový [7]. Prvé obstarávacie podujatie bolo určené výhradne pre letecké spoločnosti a prebiehalo od 28. októbra do 29. novembra 2024, pričom ho podporila vláda Guyany. Na tomto podujatí bolo v ponuke 1 milión oprávnených emisných jednotiek za fixnú cenu 21.7\$ za tonu. Jedenásť leteckých spoločností zakúpilo emisné jednotky CORSIA fázy 1 od vlády Guyany. IATA prostredníctvom centralizovaného trhu pre CORSIA emisné jednotky (ACE) plánuje v roku 2025 organizovať štvrtročné obstarávacie podujatia CORSIA EEU pre letecké spoločnosti. [10] Projekcie IATA odhadujú, že v prvej fáze (2024–2026) bude dopyt po uhlíkových kreditoch v rozmedzí 107 až 161 miliónov ton CO₂ [7]. ACE funguje od roku 2020 a do roku 2025 sa na burze obchodovalo s viac ako 20 miliónmi ton uhlíkových kreditov [11]. Dôležitým prvkom pokroku je vytvorenie štandardov kvality kreditov – ICAO zaviedlo kritériá a schvaľuje spôsobilé projekty, aby zaistené kompenzácie reálne predstavovali trvalé a dodatočné zníženie emisií. V rámci CORSIA už vznikol centrálny register a metodiky monitorovania, vykazovania a verifikácie emisií aerolínií.

2.1.3. Význam pre redukciu emisií:

CORSIA má zásadný význam ako prvý celosvetový trhový mechanizmus pokrývajúci celý sektor jedného odvetvia [4]. Umožňuje medzinárodnému letectvu riešiť svoje emisie jednotne, v duchu spoločného ale rozlíšeného prístupu –

bohatšie štáty sa zapojili skôr, kým menej rozvinuté krajiny dostali viac času [7]. Tento globálny rozsah pomáha predchádzať nerovnováhe v reguláciách a konkurenčným skresleniam, ktoré by vznikli, ak by jednotlivé regióny zavádzali odlišné schémy. Hoci CORSIA samotná neposkytuje trvalé zníženie emisií (ide o kompenzácie mimo sektor), vytvára most k dlhodobej dekarbonizácii – má platiť, kým nové technológie, účinnejšie lietadlá a udržateľné palivá nedosiahnu masové rozšírenie (MBM FAQ1, 2016). Kritici upozorňujú, že ak by CORSIA zostala jediným opatrením, nepostačovala by k splneniu cieľov Parížskej dohody, keďže podľa odhadov by bez predĺženia pokryla len okolo 6% kumulatívnych emisií letectva do roku 2050 [12]. Avšak v kombinácii s alternatívnymi palivami či technologickými inováciami predstavuje CORSIA dôležitý „štartovací mechanizmus“ na okamžité obmedzenie rastu emisií. Je tiež symbolicky významná: ukazuje, že globálna koordinácia v letectve je možná a pripravila pôdu pre ambicióznejšie záväzky, ako napríklad deklarácia z COP26 podporujúca nulové emisie v letectve do 2050 [13]. ICAO preto priebežne hodnotí a aktualizuje zoznam akceptovaných offsetových programov [7]. CORSIA tak predstavuje významný, hoci prechodný krok smerom k dlhodobej udržateľnosti leteckej dopravy.

2.2. Analýza leteckých spoločností

Letecké spoločnosti po celom svete sa čoraz častejšie verejne hlásia k cieľu dosiahnuť čisté nulové emisie skleníkových plynov do roku 2050. Ich prístupy k znižovaniu emisií sa však výrazne líšia – od aktívnych lídrov investujúcich do udržateľných palív až po aerolínie, ktoré túto tému komunikujú minimálne alebo ju otvorene spochybňujú. Na základe analýzy výročných správ, verejných vyhlásení a rebríčka SAF Observatory z roku 2024 je možné rozdeliť letecké spoločnosti do viacerých skupín podľa podobnosti ich postojov k dekarbonizácii letectva. Nasleduje prehľad hlavných skupín a ich charakteristík, vrátane konkrétnych príkladov spoločností, ich názorov, cieľov a stratégií.

2.2.1. Aktívni lídri v oblasti dekarbonizácie

Ide o spoločnosti, ktoré patria k najpokročilejším v prístupe k znižovaniu emisií a verejne podporujú ambiciózne ciele typu net zero 2050. Títo lídri si stanovili aj konkrétne strednodobé míľniky a výrazne investujú do udržateľných leteckých palív. Príkladom je Air France-KLM Group, ktorá deklarovala dosiahnutie čistých nulových emisií do roku 2050 a ako jedna z prvých si stanovila cieľ primiešať 10% SAF do paliva do roku 2030 [13]. Na potvrdenie tohto cieľa podpísala v roku 2022 dlhodobé zmluvy na dodávku 1,6 milióna ton SAF [14]. Vďaka týmto krokom sa Air France-KLM nachádza na prvom mieste v rebríčku SAF Observatory [14]. Podobne International Airlines Group (IAG), zastrešujúca British Airways, Iberia a ďalšie, patrí k lídrom. Nakúpila ekvivalent 12% celosvetovej produkcie SAF v roku 2023 [15]. Medzi transatlantickými dopravcami vyniká United Airlines, ktorý ako prvý ohlásil cieľ net zero do 2050 bez použitia kompenzácie emisií [16]. Spoločnosť United masívne obnovuje flotilu, podporuje vývoj elektrických a vodíkových lietadiel a najmä investuje do SAF a syntetických palív. Napríklad uzavrela zmluvy na odber najmenej 300 miliónov galónov SAF od spoločnosti Dimensional Energy, výrobcu tzv. e-kerosínu, a spustila program Eco-Skies Alliance na financovanie SAF za účasti korporátnych zákazníkov [17] [18]. K lídrom patria aj

JetBlue Airways v USA. Táto spoločnosť chce dosiahnuť uhlíkovú neutralitu už do roku 2040, teda o desať rokov skôr než väčšina odvetvi, a do roku 2030 chce nahradiť 10% paliva SAF [19]. JetBlue od roku 2020 dobrovoľne kompenzovala emisie na všetkých domácich letoch a postupne prechádza k priamejším opatreniam, vrátane zmlúv na nákup SAF, napr. od spoločnosti Neste, a zapojenia sa do pilotných projektov dodávok SAF na letiská. V Európe môžeme medzi proaktívnych lídrov zaradiť aj Norwegian Air Shuttle, ktorá ako stredne veľká aerolínia zaujala výrazný postoj. Investovala do projektu výroby syntetického paliva Norsk e-Fuel (získala v ňom majetkový podiel) a zaviazala sa k výraznému podielu SAF, 16–28% do roku 2030 [18]. Tieto spoločnosti deklarujú, že klimatická udržateľnosť je jadrom ich dlhodobej stratégie, a ich konkrétne kroky ako investície do moderných lietadiel, veľké objednávky SAF a pilotné projekty s alternatívnymi palivami nasvedčujú serióznemu prístupu k dekarbonizácii letectva.

2.2.2. Reaktívny prístup

Do tejto skupiny spadajú letecké spoločnosti, ktoré síce uznávajú potrebu znižovať emisie a formálne sa hlásia k cieľu net zero 2050, avšak ich iniciatívy sú menej ambiciózne a skôr vyvolané regulačnými požiadavkami, trhovými podmienkami alebo verejnou mienkou. Tieto aerolínie kladú dôraz na postupné zlepšovanie efektivity a na kompenzácie emisií skôr než na prelomové inovácie. Lufthansa Group je reprezentatívnym príkladom. Skupina zahŕňajúca Lufthansu, Austrian, Swiss a ďalšie aerolínie stanovila cieľ uhlíkovej neutrality do 2050 a redukcie emisií o 50% do roku 2030, oproti roku 2019 [20]. Na dosiahnutie týchto cieľov sa Lufthansa spolieha najmä na urychlenú obnovu flotily, optimalizáciu letových operácií a čiastočné využívanie SAF. Zároveň však otvorene priznáva, že značnú časť nízkouhlíkových riešení premietne do cien leteniek. V roku 2024 zaviedla Lufthansa príplatok k letenkám od 1€ do 72€ ako Environmentálny poplatok, ktorým prenáša na cestujúcich časť nákladov na nové ekologické regulácie, akým je zrušenie bezplatných emisných povoleniek v EÚ. Tento krok ilustruje skôr reaktívny postoj. Spoločnosť plní nariadenia a dokonca sa pripravuje na budúce kvóty SAF 2% od 2025, 6% od 2030 v rámci EÚ, avšak náklady a zodpovednosť posúva na zákazníka [20]. Lufthansa taktiež ponúka tzv. Green Fares. Sú to tarify, kde za príplatok zabezpečí plnú kompenzáciu uhlíka pre jednotlivca na daný let. Nemusí ich využiť každý a lákajú skôr business cestujúcich pretože ponúkajú viac vernostných bodov [21]. Lufthansa má odberové zmluvy SAF na báze kukurice s výrobcom paliva Gevo. Zostáva nejasné, či Gevo skutočne dosiahne úspory emisií. Biopalivá na báze kukurice, nie sú udržateľné kvôli svojmu neefektívnemu využívaniu pôdy, konkurencii s potravinovou bezpečnosťou, negatívnym dopadom na životné prostredie a príspevku k nepriamym zmenám využívania pôdy [18]. Podľa hodnotenia SAF Observatory až 87% hodnotených spoločností nezaberá v prechode na udržateľné palivá dostatočne razantne. Mnohé z nich oficiálne deklarujú podporu klimatických cieľov, ale reálne sa spoliehajú na evolučné zlepšenia a regulačné minimum, namiesto aby samy udávali tempo.

2.2.3. Skeptický alebo odmietavý postoj

V leteckom priemysle existuje aj menšia, no viditeľná skupina hlasov, ktoré otvorene spochybňujú aktuálne iniciatívy na

znižovanie emisií. Reprezentujú ich najmä jednotlivci vysoko postavení manažéri či majitelia aerolínií, ktorí poukazujú na ekonomické a technické limity dekarbonizácie. Napríklad zakladateľ a CEO americkej nízkonákladovej aerolínie Breeze Airways, David Neeleman, verejne označil udržateľné letecké palivá za neefektívny spôsob riešenia problému a „úplnú stratu peňazí“, pričom argumentuje, že SAF konkuruje potravinárstvu, zdraží letecké palivo a odradí cestujúcich vyššími cenami [22]. V októbri 2024 na konferencii World Aviation Festival Neeleman ostro polemizoval s riaditeľom IATA, keď odmietol globálnu stratégiu postavenú na SAF a navrhol radšej investovať do udržateľných palív pre kamióny a iné dieselové vozidlá, kde vidí priestor na redukcii emisií skôr než spoliehať sa na drahé biopalivá v letectve [22]. Tento postoj je v ostrom kontraste s mainstreamom odvetvia, no poukazuje na obavy časti trhu, že súčasné ekologické riešenia nemusia byť dlhodobo udržateľné bez negatívnych vedľajších efektov. Celkovo platí, že otvorený skepticizmus voči znižovaniu emisií je čoraz viac na ústupe, keďže odvetvie ako celok prijalo cieľ uhlíkovej neutrality. Avšak výhrady voči konkrétnym metódam, najmä voči SAF z biomasy, daniam či obmedzovaniu letov pretrvávajú u časti leteckých spoločností, ktoré varujú pred ohrozením dostupnosti leteckej dopravy a žiadajú realistickejšie tempo zmien.

3. NÁVRH A METÓDY IMPLEMENTÁCIE ZNIŽOVANIA EMISIÍ V LETECKEJ DOPRAVE DO ROKU 2050

Existuje niekoľko modelov znižovania emisií. V nasledujúcich podkapitolách sa pokúsime čitateľa oboznámiť s vybranými modelmi. uplatňujúce podľa názvu organizácie ktoré v letectve prispievajú k dosiahnutiu cieľa uhlíkovej neutrality do roku 2050.

3.1. NÁVRH NA ZNIŽOVANIE EMISIÍ PODĽA IATA

Letecké spoločnosti sa zaviazali dosiahnuť nulové emisie CO₂ do roku 2050 a splniť záväzky, ktoré s tým súvisia. V roku 2023 IATA predstavila svoju víziu hlavných faktorov nevyhnutných na dosiahnutie nulových emisií v leteckej doprave prostredníctvom súboru piatich cestovných máp. [23]

Na 79. výročnom valnom zhromaždení IATA a Svetovom summite leteckej dopravy, ktoré sa konalo v Istanbuli, Turecko, v dňoch 4. – 6. júna 2023 boli predstavené tzv. Net Zero Roadmaps alebo cestovné mapy IATA. Tieto mapy podrobne stanovujú míľniky, ktoré musia byť dosiahnuté v priebehu nasledujúcich piatich rokov do roku 2030 – termínu, na ktorý Medzinárodná organizácia civilného letectva (ICAO) definovala kolektívnu víziu CAAF/3. Ďalej stanovujú kľúčové kroky, ktoré musí letecký priemysel podniknúť na dosiahnutie nulových emisií CO₂ do roku 2050. Cestovné mapy IATA zahŕňujú 5 oblastí: regulačné politiky, energia a infraštruktúra nových palív, prevádzka, technológie lietadiel a financovanie. Podľa IATA je možné dosiahnuť cieľ nulových emisií do roku 2050. Úspech závisí od včasnej a harmonizovanej politickej podpory, ktorá by mala byť technologicky neutrálna a zahŕňať ciele financovanie. Najväčšia výzva nesúvisí so žiadnym konkrétnym riešením, ale s rýchlosťou, akou musí byť dosiahnutý cieľ, a s potrebnou spolupracou.

Tieto cestovné mapy predstavujú prvý podrobný prehľad zásadných krokov, ktoré je potrebné podniknúť na urychlenie prechodu k nulovým emisiám do roku 2050. Spolu ponúkajú jasný smer, a budú sa postupne rozvíjať, ako sa budeme

približovať k predbežne stanoveným míľnikom. Tieto plány nie sú určené len pre letecké spoločnosti – vlády, dodávatelia aj investori musia zohrávať aktívnu úlohu v procese znižovania uhlíkovej stopy letectva. Cestovné mapy teda slúžia ako výzva k akcii pre všetky zainteresované strany leteckého priemyslu, aby poskytli potrebné nástroje a opatrenia, ktoré umožnia úspešnú transformáciu letectva prostredníctvom tvorby novej politiky a produktov prispôbených svetu s nulovými emisiami. [24]

Výzvy spojené s masovým zvýšením výroby udržateľných leteckých palív (SAF) jasne ilustrujú význam týchto cestovných máp. SAF, ako riešenie kompatibilné s existujúcimi palivovými systémami, by malo zabezpečiť približne 62% zníženia uhlíkových emisií potrebných na dosiahnutie uhlíkovej neutrality do roku 2050. Hoci sa očakáva, že SAF bude plne implementovateľný vo flotile budúcich lietadiel, úspešnosť závisí na viacerých faktoroch – regulačnej politike, energii a infraštruktúre nových palív, technológiách lietadiel, financovaní a prevádzkových opatreniach. [24]

3.2. DESTINATION 2050

Dokument DESTINATION 2050 Roadmap 2025-2050 stanovuje plán na dosiahnutie uhlíkovej neutrality európskeho leteckého sektora (tzv. región EU+, ktorý zahŕňa krajiny EÚ, Spojené kráľovstvo a krajiny EFTA) do roku 2050. Bol vydaný výskumným inštitútom Royal NLR - Netherlands Aerospace Centre a výskumným inštitútom SEO Amsterdam Economics vo februári 2025. Tento plán obsahuje detailnú emisnú trajektóriu a opatrenia potrebné na splnenie klimatických cieľov. Podľa dokumentu má európske letectvo potenciál znížiť svoje čisté emisie CO₂ o 90% do roku 2050 oproti referenčnému scenáru. Zostávajúcich približne 10% emisií (29 miliónov ton CO₂ v roku 2050) bude potrebné kompenzovať technológiami na zachytávanie CO₂. Hlavné opatrenia potrebné na dosiahnutie tohto cieľa sú rozdelené do štyroch pilierov: Technológia lietadiel a motorov, Zavedenie udržateľných palív (SAF a vodík), Optimalizácia letovej prevádzky, Kompenzačné opatrenia a odstraňovanie uhlíka. [25]

4. VLASTNÉ NÁVRHY RIEŠENIA K ZNÍŽOVANIU EMISIÍ V LETECKEJ DOPRAVE A ICH POROVNANIE

Na základe predošlých analýz boli navrhnuté tri návrhy riešenia k znižovaniu emisií v európskej leteckej doprave.

4.1. Návrh 1

Návrh si dáva za úlohu splniť cieľ uhlíkovej neutrality do roku 2050 a rozdeľuje časový horizont do troch častí podľa dekád. Inými slovami stanovuje sekundárne ciele od 2025 do roku 2030 a do 2040.

Pre rok 2030 návrh stanovuje zníženie emisií o 10% vďaka obnove flotily novými lietadlami, ktoré sú už na trhu alebo čoskoro budú. Predstavitelia sú Airbus A321XLR, Boeing 737 MAX alebo Embraer E2. Spája ich vylepšená aerodynamika a nižšia spotreba paliva, ale stále využívajú spaľovanie tradičného leteckého paliva. Ďalšie zníženia emisií o 5% predpokladáme zo zlepšenia riadenia letovej prevádzky a prevádzkových postupov. Nasledujúcim cieľom v návrhu je zníženie emisií použitím udržateľných leteckých palív. Emisie by sa mali vďaka ich využitiu znížiť v roku 2030 o 6%, čo predstavuje 12,54 Mt CO₂. Z toho

syntetické palivá sú 1,2% alebo 2,5 Mt CO₂. Náš model predpokladá 2%-né zníženie emisií vďaka zníženiu dopytu spôsobenému vyššími cenami leteniek v dôsledku drahších udržateľných palív, a 19% emisií sa bude kompenzovať ekonomickými opatreniami, konkrétne EU ETS a systémom CORSIA. Náklady spojené s kompenzáciou emisií odradia určitú časť cestujúcich a návrh predpokladá že sa vďaka tomu znížia emisie o dodatočné 2%. Celkové plánované zníženie pre rok 2030 je 44%, čo predstavuje 91,96 Mt CO₂ z 209 Mt CO₂.

Pre rok 2040 návrh určuje zníženie emisií o 80%, teda o 196,8 Mt CO₂ z pôvodne predpokladaných 246 Mt CO₂. Návrh usudzuje nasledovné opatrenia na zníženie emisií: nové konvenčné lietadlá znížia emisie o 11%, 8% emisií budú znížené novými lietadlami, ktoré budú uvedené na trh po roku 2035 a budú mať zásadné technologické inovácie. V tejto kategórii sú zahrnuté aj elektrické lietadlá a pre potreby pomenovania budeme ich nazývať lietadlá budúcnosti. 8% ATM a operácie ako optimalizované plánovanie letov, zníženie rýchlostí, využívanie ekologickejších letových trás, minimalizácia státi na letiskách, Single European Sky, projekt SESAR. SAF bude do roku 2040 znižovať emisie o 22%. Z toho syntetické palivá sú 7%. Návrh ráta so znížením emisií o 5% vďaka poklesu dopytu v dôsledku nákladov na SAF, ďalej znížením emisií o 23% kvôli ekonomickým opatreniam a 3%-né zníženie emisií CO₂ spôsobené vplyvom poklesu dopytu po leteckej doprave ako výsledok zvýšených cien leteniek následkom dodatočných nákladov na emisné povolenky.

Návrh dosiahne v roku 2050 čisté nulové emisie. Zníženie emisií CO₂ je teda 100% predpokladaných emisií v roku 2050 a je to 290 Mt CO₂. Kládne si za cieľ zníženie emisií v pomere: 12% nové konvenčné lietadlá, 15% lietadlá budúcnosti s výrazne efektívnejšími technologickými inováciami ako napríklad open-rotor, 6% ATM a operácie, 39% SAF, z toho syntetické palivá 18%, 2% vodíkové palivo, 10% pokles dopytu spôsobený cenou SAF, 13% ekonomické opatrenia a 3% vplyvom zníženého dopytu kvôli ekonomickým opatreniam.

4.2. Návrh 2

Nízko ambiciózny návrh dosiahne v rokoch 2030, 2040 a 2050 postupné zníženie emisií CO₂ na ceste k cieľu čistých nulových emisií v roku 2050.

V roku 2030 predstavuje plánované zníženie emisií 35 % oproti referenčnej hodnote 209 Mt CO₂. Návrh počíta so znížením emisií v pomere: 4 % nové konvenčné lietadlá, 3 % ATM a operácie, 6 % SAF, vrátane 1,2 % syntetických palív, 3 % pokles dopytu vplyvom ceny SAF, 17 % ekonomické opatrenia a 2 % pokles dopytu vplyvom ekonomických opatrení.

V roku 2040 je predpokladané zníženie emisií na úrovni 60 % z referenčnej hodnoty 246 Mt CO₂, v absolútnej hodnote 147,6 Mt. Prispievajú k nemu opatrenia v nasledovnom pomere: 6 % nové konvenčné lietadlá, 7 % lietadlá budúcnosti s efektívnejšími technológiami, 5 % ATM a operácie, 22 % SAF, vrátane 7 % syntetických palív, 3 % pokles dopytu vplyvom ceny SAF, 15 % ekonomické opatrenia a 2 % pokles dopytu vplyvom ekonomických opatrení.

V roku 2050 návrh predpokladá úplné dosiahnutie cieľa, teda zníženie emisií o 100 % vzhľadom na referenčnú hodnotu 290

Mt CO₂. Zníženie je rozdelené nasledovne: 11 % nové konvenčné lietadlá, 16 % lietadlá budúcnosti, 7 % ATM a operácie, 37 % SAF, pričom 18 % z nich tvoria syntetické palivá, 2 % vodíkové palivo, 10 % pokles dopytu vplyvom ceny SAF, 14 % ekonomické opatrenia a 3 % pokles dopytu vplyvom ekonomických opatrení.

4.3. Návrh 3

Najambicióznejší návrh cieli na výraznejšie a rýchlejšie znížovanie emisií CO₂ už v medziročných cieľoch s cieľom dosiahnuť čisté nulové emisie v roku 2050.

V roku 2030 je plánované zníženie emisií na úrovni 66 % oproti referenčnej hodnote 209 Mt CO₂. Redukcia je rozdelená takto: 12 % nové konvenčné lietadlá, 9 % ATM a operácie, 9 % SAF, vrátane 1,8 % syntetických palív, 4 % pokles dopytu vplyvom ceny SAF, 30 % ekonomické opatrenia a 2 % pokles dopytu vplyvom ekonomických opatrení.

V roku 2040 sa predpokladá zníženie emisií o 233,7 Mt, teda 95 % z referenčných 246 Mt CO₂. Príspevky jednotlivých opatrení sú nasledovné: 13 % nové konvenčné lietadlá, 15 % lietadlá budúcnosti s výrazne efektívnejšími technológiami, 9 % ATM a operácie, 30 % SAF, vrátane 10 % syntetických palív, 4 % pokles dopytu vplyvom ceny SAF, 21 % ekonomické opatrenia a 3 % pokles dopytu vplyvom ekonomických opatrení.

V roku 2050 návrh predpokladá dosiahnutie zníženia emisií o 100 % voči referenčnej hodnote 290 Mt CO₂. Emisné zníženie je rozdelené: 16 % nové konvenčné lietadlá, 16 % lietadlá budúcnosti, 10 % ATM a operácie, 31 % SAF, z toho 20 % predstavujú syntetické palivá, 4 % vodíkové palivo, 9 % pokles dopytu vplyvom ceny SAF, 12 % ekonomické opatrenia a 2 % pokles dopytu vplyvom ekonomických opatrení.

5. Určenie najvhodnejšej cesty

Je lepšie investovať do vodíkových lietadiel, elektrických lietadiel, syntetických palív typu „Power-to-Liquid“ alebo udržateľných leteckých palív BIO SAF?

Najlepšou stratégiou je kombinácia všetkých vyššie uvedených ciest, s tým, že každá plní úlohu tam, kde je najefektívnejšia. Žiadna jednotlivá technológia nedokáže sama zabezpečiť dekarbonizáciu letectva. Potrebujeme synergický prístup. Porovnávané dokumenty to priamo ukazujú. Destination 2050: 83% zníženia emisií má prísť z kombinácie nových technológií a udržateľných palív a zvyšok z ekonomických opatrení – čiže jedine kombinovaný scenár vedie k cieľu.

Prečo práve kombinácia a nie jedna cesta? Každá cesta má Achillovu pätu: SAF/PtL – drahé a limit surovín; vodík – neskorý príchod a infraštruktúra; elektrina – doletové obmedzenia; offsety – environmentálne integrita a závislosť na budúcich cenách uhlíka. Kombinácia zmierňuje tieto slabiny: keď vsadíme na všetky, znižujeme riziko, že zlyhanie jednej zmarí celý plán. Toto je aj filozofia Destination 2050. V ňom sa predpokladá, že ak všetky piliere doručia, cieľ je dosiahnuteľný. Ak by niektorý zlyhal, musel by ho do istej miery zastúpiť iný. Napríklad, ak by bolo menej SAF, možno by sa muselo kúpiť viac offsetov (drahšie) alebo ak by nevyšli vodíkové lietadlá, o pár percent viac SAF a offsetov pokryje medzeru. Kombinovaný prístup je teda robustnejší voči neistotám.

Z ekonomického hľadiska, kombinácia je síce nákladná v investíciách, ale diverzifikácia môže priniesť úspory: Ak by sa po roku 2040 vodík uchytil, mohol by byť lacnejší na krátkych tratiach než PtL a ušetrilo by to náklady. Ak sa baterky zlepšia, regionálne lety by mohli byť veľmi lacné. Naopak, keby nič z toho nevyšlo, budeme platiť viac za SAF a offsety. Stále dosiahneme cieľ, len za vyššiu cenu. Najvýhodnejšie je preto neuzatvárať si dvere a investovať do viacerých smerov naraz.

6. Záver

Na záver možno konštatovať, že predložený návrh v roku 2030 výrazne presahuje účinok jednotlivých oficiálnych nástrojov EÚ aj ich kombinácie. Jeho sila spočíva v integrovaní technologických, prevádzkových a behaviorálnych zložiek spolu s mechanizmami kompenzácie. Zároveň zachováva konzistenciu s oficiálnymi plánmi v oblasti SAF a rozširuje ich dopad o realistické prvky, ktoré v aktuálnej politike EÚ nie sú samostatne kvantifikované. V porovnaní s ETS, CORSIA a ReFuelEU tak ide o návrh s vyššou celkovou ambíciou, no zároveň s oporou v dostupných technológiách a mechanizmoch.

Výsledky analýzy ukazujú, že emisné systémy majú čoraz väčší vplyv na správanie leteckých spoločností pri znížovaní emisií. Systémy ako CORSIA a EU ETS vytvárajú pravidlá, ktoré nútia spoločnosti brať ohľad na vplyv na životné prostredie pri svojich ekonomických rozhodnutiach. Reakcie leteckých spoločností sú rôzne. Niektoré investujú do ekologických palív, iné plnia len to, čo musia. Napriek rozdielom je vidieť posun smerom k zníženiu emisií. Nové opatrenia ako ReFuelEU prinášajú prvýkrát povinnosť používať udržateľné palivá. Práca ukazuje, že tlak zo strany pravidiel môže byť účinný, ale jeho úspech závisí od toho, ako dobre sa zavedie v praxi, či sú dostupné vhodné palivá a nové technológie. Emisné systémy sú teda dôležité, ale samy o sebe ešte nestačia na úplné zabezpečenie ekologickej leteckej dopravy.

Objemy na výrobu bio-SAF sú neisté a môžu konkurovať iným odvetviám. Ak sa nebudú prísne dodržiavať kritériá udržateľnosti, hrozí riziko, že pestovanie plodín na biopalivá vytlačí potravinárstvo. Dnešné SAF stoja 2–5× viac než tradičné palivá. Letecké spoločnosti a dodávatelia palív tak čelia riziku, že bez masívnej podpory nebudú rentabilní. Palivá typu PtL vyrábané z vodíka a CO₂ si vyžadujú veľké množstvo zelenej elektriny. Rizikom je, že výstavba solárnych a veterných parkov, nebude schopná pokryť tento dodatočný dopyt. V takom prípade by sa vyrábalo z elektriny obsahujúcej fosílnu zložku a e-palivo by nebolo skutočne uhlíkovo neutrálne. Hlavným obmedzením elektrických lietadiel je nízka energetická hustota batérií v porovnaní s leteckým palivom. To znamená, že lietadlo poháňané batériami bude mať aj pri optimistickom technologickom pokroku veľmi obmedzený dolet alebo kapacitu platiacej záťaže. Rizikom je, že aj o dvadsať rokov budú batérie stále príliš ťažké na to, aby dokázali poháňať stredne veľké lietadlá. Kvapalný vodík zaberá približne štyrikrát väčší objem než tradičné palivo pri rovnakom množstve energie, čo znamená, že lietadlá musia byť vybavené väčšími nádržami, ktoré sa zvyčajne umiestňujú do trupu, čím sa mení ich aerodynamika.

Autori navrhujú aby sa európske letectvo uberalo cestou silnej dekarbonizácie aj za cenu poklesu dopytu po leteckej doprave.

Predpokladaný pokles dopytu po leteckej doprave je podľa vypracovaného návrhu o 13% do roku 2050.

Pod'akovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 54ŽU-4/2025 "Možnosti využitia umelej inteligencie v študijnom programe letecká doprava pri výučbe pilotov a technikov údržby. (SmartSkyEdu)"

Referencie

[1] Reducing (2025) Reducing emissions from aviation - European Commission. Available at: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-aviation_en (Accessed: 18 April 2025).

[2] MBM FAQ1 (2016) FAQ 1. Why has ICAO decided to develop a global MBM scheme (GMBM) for international aviation? Available at: <https://www.icao.int/Meetings/HLM-MBM/Pages/FAQ1.aspx> (Accessed: 18 April 2025).

[3] COP 26 (2023) COP 26 declaration: International Aviation Climate Ambition Coalition, GOV.UK. Available at: <https://www.gov.uk/government/publications/cop-26-declaration-international-aviation-climate-ambition-coalition/cop-26-declaration-international-aviation-climate-ambition-coalition> (Accessed: 18 April 2025).

[4] ICAO Corsia (2025) Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). Available at: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx> (Accessed: 18 April 2025).

[5] Agreement (2023) Agreement reached on aviation clean energy | ATAG. Available at: <https://atag.org/news/agreement-reached-on-aviation-clean-energy> (Accessed: 18 April 2025).

[6] ICAO Conference (2023) ICAO Conference delivers strong global framework to implement a clean energy transition for international aviation. Available at: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ICAO-Conference-delivers-strong-global-framework-to-implement-a-clean-energy-transition-for-international-aviation.aspx> (Accessed: 18 April 2025).

[7] Fact sheet: CORSIA (2024) 'IATA Fact sheet: CORSIA'. Available at: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-corsia/> (Accessed: 18 April 2025).

[8] CORSIA FAQs (2022) CORSIA_FAQs_Dec2022.pdf. Available at: https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_FAQs_Dec2022.pdf#:~:text=E2%80%A2%20For%20the%20pilot%20phase,covered%20by%20CORSIA%20in%202019 (Accessed: 18 April 2025).

[9] VCS (2024) The VCS Under CORSIA, Verra. Available at: <https://verra.org/programs/verified-carbon-standard/vcs-under-corsia/> (Accessed: 18 April 2025).

[10] 1st EEU Procurement (2025) IATA Follows Successful Guyana CORSIA EEU Procurement Event with Second Event in Q1. Available at: <https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-01-22-01/> (Accessed: 18 April 2025).

[11] ACE (2025) Aviation Carbon Exchange. Available at: <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/ace/> (Accessed: 18 April 2025).

[12] Jocelyn Timperley (2019) Corsia: The UN's plan to 'offset' growth in aviation emissions, Carbon Brief. Available at: <https://www.carbonbrief.org/corsia-un-plan-to-offset-growth-in-aviation-emissions-after-2020/> (Accessed: 18 April 2025).

[13] AIR FRANCE KLM (2025) Our commitments | AIR FRANCE KLM. Available at: <https://www.airfranceklm.com/en/our-commitments> (Accessed: 19 April 2025).

[14] AIR FRANCE KLM (2022) Air France-KLM pushes its sustainability targets forward with major multi-year Sustainable Aviation Fuel (SAF) purchase agreements | AIR FRANCE KLM. Available at: <https://www.airfranceklm.com/en/newsroom/air-france-klm-pushes-its-sustainability-targets-forward-major-multi-year-sustainable> (Accessed: 19 April 2025).

[15] Kerry Preston (2024) IAG On Track for 10% SAF by 2030 | Energy Intelligence. Available at: <https://www.energyintel.com/00000193-6351-d404-a1f3-f3715ded0000> (Accessed: 19 April 2025).

[16] United (2024) Our environmental strategy | United Airlines Corporate Impact Report 2024. Available at: <https://corporateimpact.united.com/environmental-sustainability/our-environmental-strategy/> (Accessed: 19 April 2025).

[17] United (2022) Transforming Yesterday's Emissions into Tomorrow's Sustainable Aviation Fuel: United Announces Agreement with CO2 Utilization Company Dimensional Energy. Available at: <https://www.prnewswire.com/news-releases/transforming-yesterdays-emissions-into-tomorrows-sustainable-aviation-fuel-united-announces-agreement-with-co2-utilization-company-dimensional-energy-301568237.html> (Accessed: 19 April 2025).

[18] The SAF Observatory (2024) 202410_SAF-Observatory_Briefing-2.pdf. Available at: https://www.transportenvironment.org/uploads/files/202410_SAF-Observatory_Briefing-2.pdf (Accessed: 19 April 2025).

[19] Neste (2022) Neste and JetBlue partner to make flying more sustainable, Neste. Available at: <https://www.neste.com/en-us/news-and-insights/case-story/neste-and-jetblue-partner-make-flying-more-sustainable> (Accessed: 19 April 2025).

[20] Lahey, S. (2024) Lufthansa Raises Fares to Cover Costs of New Climate Regulations, ESG Today. Available at: <https://www.esgtoday.com/lufthansa-raises-fares-to-cover-costs-of-new-climate-regulations/> (Accessed: 19 April 2025).

[21] Green Fares (2025) Green Fares: More sustainable air travel. Available at: <https://www.lufthansa.com/gr/en/green-fare> (Accessed: 19 April 2025).

[22] Amely Mizzi (2024) 'Controversy over SAF: David Neeleman opposes IATA position', Aviation.Direct, 11 October. Available at: <https://aviation.direct/en/controversy-about-saf-david-neeleman-opposes-the-iata-position> (Accessed: 19 April 2025).

[23] policy-net-zero-roadmap.pdf (2024). Available at: <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/policy-net-zero-roadmap.pdf> (Accessed: 4 April 2025).

[24] IATA Press Release No: 26 (2023). Available at: <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-06-04-03/> (Accessed: 4 April 2025).

[25] Elisabeth van der Sman et al. (2025) DESTINATION-2050-Roadmap-2025.pdf. Available at: <https://www.aci-europe.org/downloads/resources/DESTINATION-2050-Roadmap-2025.pdf> (Accessed: 25 April 2025).



OPTIMALIZÁCIA RIADENIA UAV: ANALÝZA ĽUDSKÉHO FAKTORA A JEHO VPLYV NA BEZPEČNOSŤ A EFEKTIVITU PREVÁDZKY

Alexandra Zacharová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Pavol Pecho
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Currently, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) is on the rise, which implies that care must be taken to ensure safe operation. Safe operation depends on several factors, not only technical but also, to a significant extent, on the human factor, the human factor. This paper aims to investigate the impact of the human factor, specifically the impact of cognitive ability, stress and reaction time of pilots on stress reactions in various simulated emergency situations. The goal of the research is to optimize flight procedures and minimize the negative impact of the human factor on UAV control. In the experimental part, the research addresses the variability of heart rate (HRV) and electroencephalographic (EEG) data that were measured during UAV control in the presence of simulated critical situations. Other measured parameter such as reaction time, maneuver accuracy or stress response provide important information about the neurophysiological load of operators. Thus, the outcome of the study is to identify critical situations, analyze decision-making processes and propose streamlined training procedures for UAV operators.

Keywords

UAV, human factor, human factor in aviation, stress, reaction time, critical phases of flight, flight procedure optimization, cognitive abilities, pilot workload, HRV, HR, EEG

1. Úvod

Dynamický vývoj bezpilotných lietadiel (UAV) otvára nové možnosti ich využitia v civilnom a komerčnom sektore, no zároveň kladie vysoké nároky na bezpečnosť a spoľahlivosť ich prevádzky. S rastúcou autonómiou a diverzifikovaním úloh UAV sa čoraz viac zdôrazňuje význam ľudského faktora, ktorý aj napriek technologickému pokroku zostáva kľúčovým činiteľom ovplyvňujúcim úspech misie.

Ako uvádza Medzinárodná organizácia civilného letectva, ľudský faktor je najflexibilnejšou a najcennejšou súčasťou leteckého systému, ale aj najzraniteľnejšou voči vplyvom, ktoré môžu negatívne ovplyvniť výkonnosť. Tento aspekt je zásadný, keďže aj napriek schopnosti prispôbovať sa je človek citlivý na stresové faktory, ktoré môžu ovplyvniť jeho výkon, najmä pri rýchlom a presnom rozhodovaní.

Téma je aktuálna v súvislosti s rastúcim dopytom po integrácii UAV do bežnej leteckej prevádzky, kde sa kladie dôraz nielen na technickú bezpečnosť, ale aj na optimalizáciu interakcie človek–stroj. Aj keď existuje množstvo štúdií o ľudských chybách v prípade pilotov tradičných lietadiel, výskum psychofyzologickej záťaže operátorov UAV pri núdzových situáciách je stále relatívne obmedzený.

Cieľom tejto štúdie je na základe experimentálneho výskumu vyhodnotiť reakcie operátorov UAV v rôznych situáciách a navrhnúť opatrenia na optimalizáciu postupov, ktoré minimalizujú riziko zlyhania ľudského faktora v náročných situáciách. Experiment zahŕňal merania srdcovej variability (HRV) a mozgovej aktivity (EEG) u dvoch skupín operátorov: skúsených (>50 letových hodín) a menej skúsených (<10 letových hodín).

2. Teoretické pojmy a ich význam

Táto kapitola je zameraná na kľúčové pojmy, ktoré tvoria dôležitú súčasť práce, ako aj samotného experimentu. Bližšie špecifikujem základné kognitívne procesy, ktoré sú nevyhnutné pre efektívne spracovanie informácií a rozhodovanie v dynamických podmienkach a tiež pojmy ako neuroergonómia či biologická spätná väzba, tzv. biofeedback.

Kognitívne schopnosti

Kognitívne schopnosti sú schopnosti, ktoré mozog využíva na vykonávanie základných každodenných úloh, ako je myslenie, učenie, čítanie, zapamätanie, hovorenie, počúvanie a pozornosť. Kognitívne schopnosti sa v mozgu vyskytujú prirodzene, ale je možné ich ďalej rozvíjať a posilňovať. Vo všeobecnosti poznáme štyri kategórie kognitívnych schopností: pozornosť, pamäť, logika a uvažovanie a spracovanie. Hoci všetky kognitívne schopnosti patria do jednej z týchto štyroch kategórií, takmer vždy sa navzájom prelínajú [1].

Kognitívna záťaž

Kognitívna záťaž je záťaž vzťahujúca sa na mentálne úsilie potrebné na spracovanie informácií. Takáto záťaž je ovplyvnená interaktivitou prvkov, pričom vysoká interaktivita vedie k väčšej kognitívnej záťaži [2].

Vo všeobecnej rovine rozdelujeme kognitívnu záťaž do troch hlavných kategórií:

Vnútná kognitívna záťaž: do tejto kategórie spadajú zručnosti a materiály, ktoré sa napr. študent musí naučiť, z čoho vyplýva, že závisí od náročnosti učebného obsahu [3].

Vonkajšia kognitívna záťaž: pri tejto kategórii hovoríme o zaťažovaní pracovnej pamäte, napr. ak hovoríme

o študentoch, na ktorých vplývajú rôzne externé vplyvy, napr. interakcia s učebnými materiálmi [4].

Generatívna kognitívna záťaž: v tomto prípade ide o ľahkosť prepájania súčasných informácií s nadväzujúcimi. Tento typ kognitívnej záťaže je súčasťou tzv. kódovania informácií do dlhodobej pamäte [5].

Kognitívna flexibilita

Kognitívna flexibilita je schopnosť flexibilne priradovať zdroje na spracovanie a riadenie informácií v neustále sa meniacom prostredí. Kognitívna flexibilita sa zvyčajne skúma skúmaním schopnosti človeka prepínať medzi mentálnymi súbormi informácií alebo medzi dvoma či viacerými rôznymi úlohami. Príkladom je prepínanie medzi venovaním pozornosti rôznym hovoriacim v skupinových rozhovoroch [6].

Neuroergonómia

Neuroergonómia je oblasť výskumu venujúca sa štúdiu mozgu pri práci a v každodennom živote. Táto veda predstavuje spojenie medzi teoretickými aspektami v kognitívnej neurovede, bioinžinierstve, informatike a ľudských faktoroch. Neuroergonómia navrhuje využívanie najmodernejších zobrazovaní mozgu na odvodenie nervových korelátov, ktoré sú základom výkonu v reálnych podmienkach. Jedným z konečných cieľov neuroergonómiky je navrhnúť neuroadaptívne systémy na optimalizáciu spolupráce človeka a stroja [7].

Stres a stresory

Všeobecne môžeme stres definovať ako súbor reakcií určitého organizmu na vnútorné alebo vonkajšie podnety, pričom tieto podnety narúchajú bežný chod a funkcie organizmu. Tieto reakcie pomáhajú organizmu prekonávať neobvyklé či mimoriadne situácie [8].

Stres je výslednou reakciou na určitý stresový podnet, tzv. stresor. Stresory môžeme rozdeliť do niekoľkých kategórií: fyzikálne, toxické, infekčné, psychické či sociálne [8].

Reakčný čas

Reakčný čas sa vzťahuje na presné meranie času, ktorý jednotlivci potrebujú na vytvorenie odpovede na úlohu. Bežne sa používa ako nepriame meradlo náročnosti úlohy, pričom sa predpokladá, že úlohy, ktoré si vyžadujú dlhšie spracovanie, budú trvať dlhšie. Rozdiely v reakčnom čase medzi rôznymi skupinami môžu poskytnúť informácie o úlohe špecifických oblastí mozgu [9].

Situačné povedomie

Situačné povedomie je schopnosť vnímať, pochopiť a účinne reagovať na určitú situáciu. Zahŕňa pochopenie daných okolností, zhromažďovanie relevantných informácií, ich analýzu a prijímanie informovaných rozhodnutí s cieľom úspešne riešiť všetky potenciálne riziká, nebezpečenstvá alebo udalosti, ktoré by mohli nastať. Cieľom situačného povedomia je umožniť rýchlu a bezpečnú reakciu na možné incidenty prostredníctvom rozhodovania ľudí [10].

Biologická spätná väzba

Biologická spätná väzba, známa aj ako biometrická spätná väzba, či z anglického jazyka ako biofeedback, sa vzťahuje na proces merania fyziologických reakcií tela na rôzne podnety, napr. s cieľom zvýšiť výkonnosť [11].

3. Metodika a metódy skúmania

Vypracovanie práce si vyžadovalo systematický prístup, dôsledné plánovanie a efektívne využitie vhodných výskumných metód. Po konzultácii s vedúcim práce a definovaní hlavného cieľa bolo nevyhnutné určiť aj optimálny spôsob jeho dosiahnutia. Nasledovala podrobná analýza danej problematiky, ktorá zahŕňala zhromažďovanie relevantných informácií z domácej aj zahraničnej odbornej literatúry, vedeckých článkov a metodických postupov. Tieto poznatky boli následne spracované a syntetizované do logického a uceleného celku.

Dôležitou súčasťou výskumu bol aj vlastný experiment, v rámci ktorého operátori UAV vykonávali simulované letové úlohy v rôznych podmienkach podľa špecificky nastavených podmienok. Na základe získaných teoretických a experimentálnych údajov, doplnených o predpokladané výsledky boli formulované odporúčania na optimalizáciu výcviku. Cieľom týchto opatrení je minimalizovať negatívny vplyv ľudského faktora na bezpečnosť prevádzky UAV.

Po skompletizovaní všetkých zistení a analýz boli na základe aplikovaných metód spracované konečné výsledky, ktoré viedli k návrhu efektívnych výcvikových postupov.

3.1. Metodológia experimentu

Na sledovanie zmien v stresovej záťaži a kognitívnom vyťažení operátora UAV budú použité dve hlavné meracie technológie:

- Pulzný oximeter – na meranie srdcovej frekvencie a variabilitu srdcového tepu (HRV), ktoré sú indikátormi stresu.
- Čelenka Muse 2 – EEG zariadenie na sledovanie mozgových vln, identifikáciu úrovne koncentrácie a kognitívnej záťaže.

Každý operátor absolvuje experiment v kontrolovaných podmienkach, pričom bude zaznamenávaný jeho výkon v jednotlivých fázach letu. Hodnotiť sa budú parametre ako reakčný čas, typ zvoleného manévru, stresová odozva (EEG, HRV) presnosť vykonania úlohy a počet chýb. Pred vykonaním samotného experimentu boli stanovené hypotézy, ktoré sa na základe nameraných údajov potvrdia alebo vyvrátia. Výsledky experimentu pomôžu identifikovať fázy letu UAV, v ktorých je operátor najviac vystavený stresu a kognitívnej záťaži. Na základe týchto zistení bude možné navrhnúť optimalizáciu letových postupov UAV s cieľom minimalizovať ľudský faktor a zvýšiť bezpečnosť a efektivitu riadenia.

4. Opis zariadení využívaných pri experimentálnom skúmaní

Pre zabezpečenie presného a spoľahlivého výskumu je nutné využívať vhodné meracie zariadenie. Každé z použitých zariadení

má špecifickú úlohu či už pri monitorovaní samotného letu UAV alebo fyziologických reakcií a schopností pilota. Táto kapitola poskytuje podrobný opis jednotlivých zariadení používaných pri experimente.

UAV s telemetrickým systémom

Telemetria vo všeobecnosti poskytuje prehľad o výkonnosti aplikácií v reálnom čase. Ide o automatické meranie a bezdrôtový prenos údajov zo vzdialených zdrojov. Princíp fungovania je založený na snímaní údajov na zdroji a ich následné zasielanie na vzdialené miesta na monitorovanie a analýzu. Telemetrické údaje môžu byť prenášané pomocou analógových alebo digitálnych elektronických zariadení a údaje sú odosielané pomocou počítačových sietí, satelitov, káblov či infračervených a ultrazvukových technológií [12, 13, 14].

V našom prípade v súvislosti s UAV hovoríme o diaľkovom prenose meraných údajov medzi UAV a pozemnou stanicou (ovládaním). Tieto dáta predstavujú napríklad výšku a rýchlosť letu, polohu UAV alebo stav batérie.

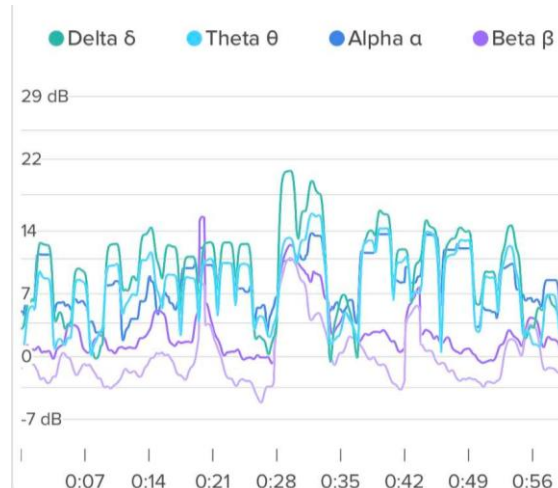
Variabilita srdcovej frekvencie

Vzhľadom na fakt, že ľudské srdce nevytvára pravidelné úder, doba medzi údermi je takmer vždy odlišná. Práve tento jav nazývame variabilita srdcového tepu/ srdcovej frekvencie. Skratka HRV je odvodená z anglického „heart rate variability“ a jednotkou je milisekunda. Vo všeobecnosti platí, že ak sa človek nachádza v pokojnom režime, kedy je možná regenerácia, variabilita srdcového tepu je vyššia v porovnaní so situáciou kedy je človek v režime záťaže, kedy je hodnota HRV nižšia [15].

EEG snímač – Muse 2

EEG je skratka pre elektroencefalogram, ktorý predstavuje záznam mozgovej aktivity. V medicíne je toto zariadenie využívané najmä pri diagnostike závažných ochorení súvisiacich s mozgovou aktivitou, napr. epilepsia alebo problémy s pamäťou [16].

Zariadením na snímanie a následné skúmanie mozgovej aktivity pre tento experiment je čelenka Muse 2. Toto zariadenie dokáže pomocou pokročilých mozgových senzorov EEG rozpoznávať mozgovú aktivitu a tiež poskytovať spätnú väzbu v reálnom čase vo forme. Údaje, ktoré Muse zaznamenáva, sú elektrickou aktivitou, ktorá pochádza zo synchronnej časti mozgu. Tzv. „surový“ signál mozgu sa skladá z niekoľkých frekvencií, ktoré sú v rôznych množstvách. Takýto surový signál môžeme rozdeliť na zložené frekvencie a tie zoskupiť do frekvenčných pásiem. Tieto pásma označujeme ako výkonové pásma, konkrétne pásmo Alfa, Beta, Theta, Gama a Delta. Graf týchto frekvenčných pásiem vidíme na obrázku nižšie, pričom každé frekvenčné pásmo je vyznačené inou farbou [17].



Obrázok 1 Graf záznamu EEG

Každé z pásiem je ohraničené frekvenciou, a zároveň pokrýva pásmo ideálne pre určité činnosti:

- delta δ (0,5 – 4 Hz) – Hlboký spánok/ nesnívanie
- theta θ (4 – 8 Hz) – Spánok, hlboká relaxácia, vizualizácie
- alfa α (8 – 13 Hz) – Uvoľnenie a pokoj
- beta β (13 – 32 Hz) – Aktívne myslenie alebo riešenie problémov
- gama γ (32 – 100 Hz) – Hyperaktivita mozgu, ideálny čas na učenie [17].

Pri experimente očakávame, že EEG frekvencie budú prevažne v rozmedzí Alfa (pokojný a sústredený stav) a Beta (aktívne premýšľanie, riešenie kritických situácií). V niektorých fázach experimentu môžeme predpokladať, že mozgová aktivita (najmä u menej skúsených pilotov) môže prejsť aj do frekvencie Gama vln [17].

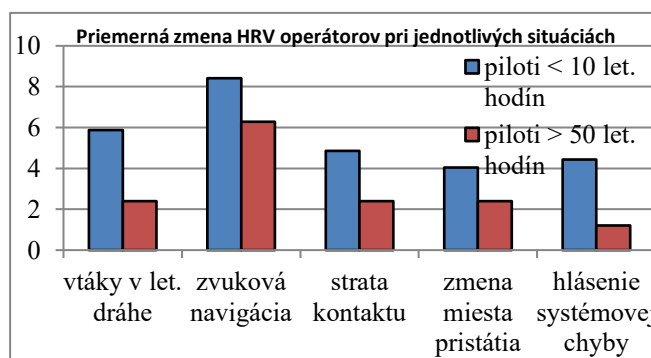
Okrem mozgovej aktivity je toto zariadenie schopné monitorovať aj srdcovú frekvenciu [17].

5. Porovnanie úloh podľa psychofyziologického zaťaženia

S cieľom identifikovať úlohy UAV operátora, ktoré predstavujú najväčšiu psychofyziologickú záťaž, bola vykonaná analýza priemernej zmeny HRV a tiež mozgovej aktivity počas jednotlivých fáz simulovanej misie. Úlohy boli zámerne vybrané tak, aby pokrývali široké spektrum potenciálnych núdzových situácií, ktoré môžu nastať počas prevádzky UAV – od environmentálnych hrozieb (výskyt vtákov v blízkosti UAV), cez systémové chyby, až po situácie vyžadujúce zvýšenú senzorickú orientáciu, ako je orientácia na základe zvukovej navigácie. Tieto údaje nám umožňujú objektívne porovnávať náročnosť rôznych typov úloh a tiež poukázať na situácie, ktoré si vyžadujú zvýšenú pozornosť z pohľadu prevencie chýb a optimalizácie pracovného zaťaženia.

Na obrázku 2 vidíme graficky zobrazené porovnanie priemernej zmeny HRV operátorov (skúsenejší aj menej skúsení operátori) v jednotlivých situáciách. Z grafu vidíme, že najvyššia zmena nastala pri núdzovej situácii, v ktorej boli operátori navigovaní výlučne zvukovými signálmi. Zo všetkých analyzovaných situácií vykazovala najvyššiu priemernú zmenu (v tomto prípade hovoríme o poklese) hodnôt HRV. Tento výsledok je možné vysvetliť vďaka kombinácii viacerých faktorov, ktoré vplývali na zvyšovanie kognitívneho a senzorického zaťaženia operátora. Počas tejto úlohy bolo potrebné spracovávať informácie z viacerých zdrojov – vizuálne sledovanie UAV, auditívne vnímanie zvukových inštrukcií a zároveň veľkú úlohu zohrávala samotná neštandardná situácia. Takáto záťaž vyplývajúca z viacerých zmyslových kanálov môže viesť k rozptyľovaniu pozornosti, keďže mozog je nútený rozdeliť kapacity medzi rôzne zdroje informácií a podnetov.

Z výskumov v oblasti ľudského faktora je známe, že so stúpajúcim počtom podnetov sa súčasne zvyšuje mentálna náročnosť úlohy a rovnako sa súčasne znižuje schopnosť udržiavať pozornosť. Ak hovoríme o menej známej forme podnetu (napr. zvuková navigácia, ktorá nie je bežne využívaná) operátor musel vyvinúť viac vedomého úsilia na interpretáciu a následné vykonanie príkazov. Tento fakt môže ešte zvýrazniť stresovú odozvu. Výrazná zmena HRV v tejto situácii poukazuje na zvýšenú mieru záťaže a potvrdzuje myšlienku, že úlohy s vyšším množstvom podnetov a nižšou predvídateľnosťou predstavujú výzvu z hľadiska stresu a kognitívneho výkonu operátorov UAV.



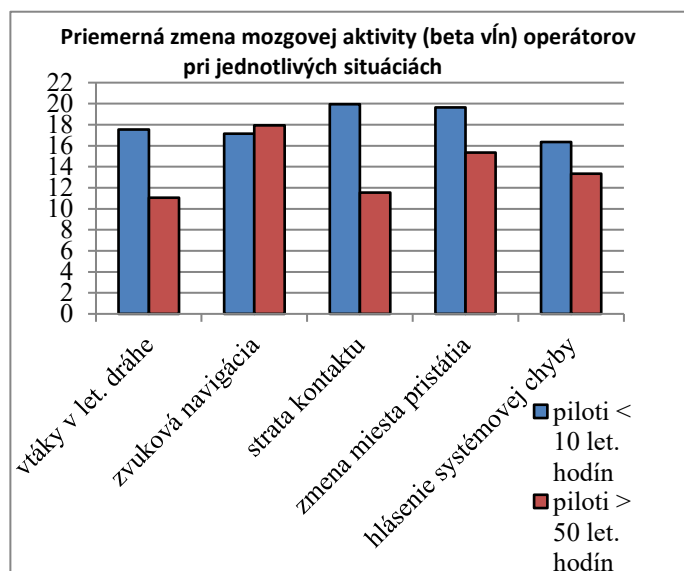
Obrázok 2 Graf priemernej zmeny HRV operátorov pri jednotlivých situáciách

Na obrázku 3 vidíme graficky zobrazené porovnanie priemernej mozgovej aktivity skúsenejších aj menej skúsených operátorov UAV. Analýza priemernej mozgovej aktivity počas jednotlivých núdzových situácií odhalila rozdiel medzi skupinou skúsenejších a menej skúsených operátorov UAV. U skúsenejších operátorov boli najvyššie hodnoty priemernej zmeny zaznamenané pri úlohách zvukovej navigácie a zmeny miesta pristátia. Zvuková navigácia si vyžadovala súčasné vnímanie a spracovanie zvukových pokynov, vizuálnu kontrolu a zároveň orientáciu v priestore, čo vytvára vysoké nároky na kognitívne funkcie, ako napr. pozornosť a pamäť. Zmena miesta pristátia pravdepodobne vyvolala zvýšenú aktiváciu mozgu v dôsledku nutnosti prehodnotiť letový plán, prijať a spracovať nový pokyn a vykonať precízny manéver v novej situácii.

U menej skúsených operátorov bola najvyššia priemerná zmena mozgovej aktivity zaznamenaná pri úlohách straty kontaktu

s UAV a zmeny miesta pristátia. Strata kontaktu predstavuje kritickú udalosť, ktorá môže spôsobiť stres, najmä ak operátor nemá dostatočne zvládnuté stratégie na riešenie takejto situácie. Zaujímavým zistením je, že zmeny mozgovej aktivity pri tejto skupine boli počas celej misie relatívne vyrovnané, bez výrazných výkyvov medzi jednotlivými úlohami. Tento jav môže naznačovať vyššiu úroveň napätia alebo mentálneho vyťaženia počas celej misie. Predpokladáme, že je to dôsledkom nižšej úrovne automatizácie, menšou istotou pri riešení úloh a vyššou kognitívnu náročnosťou aj pri relatívne menej náročných situáciách.

Zistené rozdiely poukazujú na význam skúsenosti pri spracúvaní zložitejších informácií a prispôbovaní sa nečakaným udalostiam. Skúsenejší operátori vykazujú vyššiu variabilitu mozgovej aktivity v závislosti od typu úlohy, čo môže odrážať ich schopnosť cielene a efektívne distribuovať ich mentálnu kapacitu podľa aktuálnych požiadaviek. Naopak, menej skúsení operátori vykazovali rovnomerne zvýšenú kognitívnu záťaž počas celej misie, čo má súvis s nižšou mierou automatizácie základných činností a obmedzenou schopnosťou flexibilne reagovať na meniace sa podmienky.



Obrázok 3 Graf priemernej zmeny mozgovej aktivity operátorov pri jednotlivých situáciách

6. Návrh odporúčaní na optimalizáciu riadenia UAV a letových postupov UAV

Na základe výsledkov experimentu a vyhodnotenia jednotlivých parametrov (výkonnostných a fyziologických) bolo navrhnutých niekoľko bodov, odporúčaní, pri ktorých predpokladáme, že prispievajú k zefektívneniu riadenia UAV a tiež zvyšujú efektívnosť jednotlivých UAV operácií. Podľa výsledkov experimentu sme dokázali určiť, že stres a kognitívne zaťaženie, resp. preťaženie, výrazne vplývajú na výkon operátorov UAV. Nasledujúce body boli preto navrhnuté v súvislosti s optimalizáciou letových postupov a manažmentom UAV s dôrazom na minimalizáciu rizík súvisiacich s ľudským faktorom. Odporúčania sú orientované najmä na prevenciu chýb, zlepšovanie rozhodovacích procesov s cieľom zvyšovať celkovú odolnosť operátorov UAV voči stresovým situáciám.

Je dôležité dodať, že nasledujúcich odporúčaní sú primárne určené pre špecificky náročné UAV misie, napríklad vojenské, pátracie či záchranné misie, kde sú kladené vyššie nároky na výkonnosť, presnosť a psychickú odolnosť operátora. Ich aplikácia samozrejme má zmysel aj v prostredí rekreačného lietania či hobby misiách, najmä pre zvýšenie povedomia o rizikových faktoroch a podpore správnych návykov. Napriek tomu najväčší význam a prínos majú tieto odporúčania v profesionálnych a kritických situáciách, kde aj drobná chyba môže spôsobiť závažné nežiaduce následky. Odporúčania sú uvedené v nasledujúcich podkapitolách.

Návrhy odporúčaní:

a) Návrh praktického výcviku a simulátora pre operátorov UAV

Zavedenie povinného výcviku a simulátora pre operátorov UAV je kľúčovým krokom na zvýšenie bezpečnosti a efektivity UAV operácií, najmä v náročnejších a rizikovejších oblastiach. V súčasnosti nie je praktický výcvik povinný pre všetky kategórie UAV.

Na základe výskumu odporúčame zavedenie povinného praktického výcviku pre všetkých operátorov UAV, pričom dĺžka výcviku sa bude líšiť v závislosti od typu certifikácie UAV a náročností plánovaných misií, na ktoré má byť operátor pripravený. Základný výcvik by mal trvať cca 3 hodiny, čo by malo postačovať na osvojenie si základov pilotáže a reakcií na štandardné letové operácie a úkony. Pre náročnejšie misie, ktoré si vyžadujú vyššiu úroveň precíznosti, navrhujeme výcvik v rozsahu 10 – 15 hodín podľa individuálnej potreby operátora.

V rámci výcviku budú simulované rôzne núdzové a kritické situácie – technické problémy, výpadky spojenia, nepriaznivé poveternostné javy a ďalšie. Dôležitou súčasťou návrhu je zavedenie adaptívneho systému obtiažnosti, ktorý bude na základe reálne meraných stresových a fyziologických parametrov – ako sú srdcová frekvencia, variabilita srdcovej frekvencie a mozgová aktivita – upravovať náročnosť simulovaných situácií. Tento prístup zabezpečí, že operátor bude vystavený progresívne náročnejším úlohám len vtedy, ak to jeho aktuálny psychofyziologický stav umožňuje, čím sa predídzie preťaženiu a zároveň sa buduje jeho odolnosť. Výcvik bude obohatený o špecifické scenáre zamerané na rozvoj pozornosti, multitaskingu a spracovania rušivých podnetov, ktoré boli v experimente identifikované ako obzvlášť náročné. Operátor tak získava praktické skúsenosti so zvládaním kognitívne náročných situácií, ktoré majú priamy vplyv na výkonnosť a bezpečnosť riadenia UAV.

V rámci simulátora musí operátor prejsť niekoľkými úrovňami, pričom každú úroveň musí úspešne prekonať s minimálnym, vopred stanoveným percentom úspešnosti. Pokrok jednotlivca bude zároveň sledovaný dlhodobo – od vstupného merania bazálnych hodnôt až po záverečný výstup – s cieľom personalizovať výcvik a cielene rozvíjať schopnosti konkrétneho operátora. Po úspešnom prekonaní všetkých simulovaných misií bude povinnou súčasťou záverečný test, vykonaný na simulátore pod dohľadom oprávnenej osoby.

Simulátory tak umožnia operátorom bezpečne trénovať reakcie na rizikové situácie, čím sa zvýši ich pripravenosť a zníži pravdepodobnosť chýb. Zavedenie povinnosti simulátorového

výcviku významne zlepši kvalitu prípravy a zvýši bezpečnosť prevádzky UAV na všetkých úrovniach.

b) Úprava SOP so zameraním na aspekt ľudského faktora

Štandardizované operačné postupy (ďalej iba SOP) pre UAV už existujú, avšak iba v malom rozsahu reflektujú aspekt ľudského faktora – sledovanie reakčných časov, stresovej úrovne či kognitívnu záťaž. V praxi sú SOP pre UAV zamerané prevažne na technickú časť letu a bezpečnosť vo všeobecnosti, pričom človek a jeho individuálne reakcie zostávajú často mimo rámca týchto postupov.

Na základe získaných poznatkov navrhujeme rozšíriť už existujúce SOP o aspekty zohľadňujúce psychofyziologický stav operátora počas letu. Konkrétne hovoríme o :

- zavedenie sledovania tzv. biofeedback parametrov (HRV/EEG) počas kľúčových fáz letu (s cieľom identifikovať nástup kognitívneho preťaženia)
- vytvorenie reakčných scenárov pri výskyte stresovej udalosti (operátor má možnosť postupovať podľa vopred stanovených krokov)
- prispôbenie kritických rozhodovacích úloh úrovni skúseností operátora (znižovanie rizika zlyhania v krízovej situácii).
- SOP po navrhovanej úprave a doplnení bodov súvisiacich s ľudským faktorom prispeje k bezpečnejšej a efektívnejšej prevádzke UAV, a to nielen z technickej stránky ale aj ľudského výkonu.

c) Úprava letových manuálov

Na základe výskumu bolo preukázané, že zvýšená miera stresu výrazne znižuje výkonnostné schopnosti operátora UAV. Úprava letových manuálov v tomto prípade znamená:

- zavedenie odporúčaných minimálnych prestávok medzi misiami (napr. 10 – 15 minútová pauza každých 30 – 40 minút, podobne ako je to napr. v prípade ATC), a to najmä v prípade, ak má operátor naplánovaných viacero za sebou nasledujúcich letov,
- vhodná rotácia operátorov (je vhodné ak tím pozostáva z viacerých operátorov, vďaka čomu sa jednotliví členovia môžu po určitých celkoch misie striedať a efektívne tak pracovať počas celej misie),
- snaha o znižovanie kognitívnej záťaže (napr. zjednodušovanie postupov pri navigácii, identifikácii prekážok),
- doplnenie manuálov o odporúčania v súvislosti s plánovaním misií na základe skúseností operátora (náročnejšie trasy by mali byť zastrešené operátorom so skúsenosťami, prípadne menej skúseným operátorom s dozorom).

Je všeobecne známe, že určité pravidlá a odporúčania už existujú, najmä v dokumentoch ako EASA či FAA alebo tiež v rôznych prevádzkových príručkách od jednotlivých výrobcov UAV zariadení, no tieto pravidlá zvyčajne vynechávajú alebo iba okrajovo zasahujú do aspektov ľudského faktora. Navrhované úpravy letových manuálov teda spočívajú v doplnkoch týkajúcich sa najmä optimálneho načasovania misií a odporúčaných prestávok (podľa typu záťaže).

d) Tréningové programy so zameraním na zvládanie stresu

Tieto programy sú navrhované s cieľom zvýšiť pripravenosť operátorov UAV pri zvládaní náročných a najmä neočakávaných situácií. Navrhujeme doplnenie k štandardným tréningovým programom vo forme špecializovaných modulov. Tieto moduly by mali byť zamerané na psychickú odolnosť či reguláciu stresu. Súčasťou modulu je teoretická aj praktická časť, pričom v teoretickej časti pôjde o vysvetlenie mechanizmov stresu, spúšťania stresových reakcií a samotného vplyvu stresu na kognitívne funkcie, v tomto prípade najmä pozornosť a rozhodovanie. V praktickej časti bude tréning zameraný na konkrétne techniky zvládania stresu, dychové cvičenia, relaxačné cvičenia.

Súčasťou takéhoto modifikovaného tréningu bude aj simulácia krízových letových situácií, počas ktorých budú operátori vystavovaní stresujúci podnetom, podobne ako pri našom experimente. Tieto simulácie budú systematicky hodnotené pomocou údajov o HRV a EEG, vďaka čomu bude možné sledovať progres operátorov a ich schopnosti práce pod záťažou. Z dlhodobého hľadiska predpokladáme, že takýto tréning bude viesť k nižšej stresovej odozve v reálnych podmienkach a reálnom čase.

Určité tréningy a techniky ako zvládať stres a stresové situácie v tomto kontexte už existujú, a to najmä v špecializovaných oblastiach, napr. vojenský a bezpečnostný sektor, letecké výcvikové centrá a špecializované kurzy no našim prínosom v tejto oblasti je rozšírenie civilných UAV výcvikov o prvky duševnej odolnosti a zvládania stresu. Vzhľadom na fakt, že aktuálne tréningy v danej oblasti sú zamerané takmer výlučne na pilotov a často nezohľadňujú špecifiká práce UAV operátorov, považujeme za dôležité implementovať spomínané prvky aj do tréningových plánov operátorov UAV, najmä ak budú tréningové postupy obohatené o merateľné a sledovateľné údaje (EEG, HRV).

e) Zavedenie feedbackových mechanizmov v reálnom čase

Jedným z inovatívnych prvkov navrhovanej optimalizácie riadenia UAV je zavedenie systémov spätnej väzby v reálnom čase, vďaka čomu budeme schopní monitorovať fyziologický stav operátora počas letu. Systémy by využívali k detekcii stresu alebo neprimeraného kognitívneho zaťaženia dáta z tzv. biosenzorov, napr. HRV, EEG. Namerané údaje budú analyzované a ďalej softvérovým vyhodnocovaním podľa aktuálnej mentálnej záťaže operátora. Spätá väzba bude prebiehať formou zvukových, haptických alebo vizuálnych podnetov.

Vďaka tomuto systému bude operátor upozornený na potrebu úpravy tempa prevádzky či môže dostať odporúčanie na vykonanie prestávky. Ďalšou výhodou by bola možnosť automatickej aktivácie asistenčných režimov. Hlavným prínosom je teda:

- prevencia zlyhaní v reálnom čase – vďaka včasnej detekcii neprimeraného psychického stavu sa znižuje riziko chýb v rozhodovaní,
- zvýšenie adaptability systému – schopnosť operačného systému prispôbovať sa aktuálnym schopnostiam operátora,
- podpora sebaregulácie – okamžitá spätná väzba smerom k operátorovi podnecuje snahu o efektívnejšie zvládanie záťažových situácií.

Hoci je podobný mechanizmus už využívaný v niektorých simulátoroch, napr. pri vojenských programoch alebo v zdravotníctve, jeho integrácia do reálnych operácií UAV (najmä ako súčasť rozhodovacích procesov) zatiaľ nie je bežnou praxou. Zavedenie takýchto mechanizmov teda prináša inovácie z hľadiska navrhovania priameho a systematického zapojenia psychofyziologického stavu operátora do riadenia UAV, a to nie len počas tréningov, integrácie ľudského faktora do postupov, pričom je vnímaný ako dynamický faktor, na ktorý je nutné reagovať a zároveň tento návrh podporuje aktívnu prevenciu zlyhaní v reálnom čase vďaka čomu prispieva k bezpečnosti a spoľahlivosti UAV operácií.

f) Zavedenie metodiky na analýzu a vyhodnocovanie chýb operátorov UAV

Napriek pokroku v oblasti automatizácie zostáva ľudský faktor jedným z hlavných činiteľov ovplyvňujúcich bezpečnosť a spoľahlivosť operácií UAV. V prípadoch, keď dôjde k incidentu zapríčinenému prevažne zo strany operátora, je nevyhnutné venovať systematickú pozornosť analýze a vyhodnoteniu chýb. Identifikácia príčin a okolností, za ktorých k chybe došlo, predstavuje základ pre návrh účinných preventívnych opatrení. Vzhľadom na tento fakt je ďalším návrhom práve zavedenie metodiky na analýzu a vyhodnocovanie chýb operátorov, vďaka čomu bude možné systematicky analyzovať každé zlyhanie a dostaneme sa tak k cenným informáciám potrebným na zlepšenie prevádzky v budúcnosti.

Zavedenie takejto metodiky sa zameriava na systematickú identifikáciu, analýzu a zhodnotenie chýb, ku ktorým dochádza počas misií. Cieľom je zlepšiť rozhodovacie procesy, reakcie na kritické situácie a minimalizovať chyby súvisiace s kognitívnym preťažením na základe skúseností z minulosti. Metodika zahŕňa zber dát z reálnych a simulovaných situácií, vrátane technických záznamov, videozáznamov obrazoviek, komunikácie a tiež psychofyziologických údajov. Následne systém rozdelí chyby do rôznych kategórií, napr. detekčné, vykonávacie alebo rozhodovacie. Dôležitým bodom je zohľadnenie faktorov ako stres, nadmerné množstvo informácií či únava.

Inovácia prístupu spočíva v integrácii psychofyziologických údajov operátorov UAV priamo počas operácie, vďaka čomu prináša niekoľko významných prínosov:

- systémové vyhodnocovanie chýb v reálnom čase – existujúce postupy a metodiky sú často zamerané na analýzu chýb až po určitom čase. Tento návrh integruje psychofyzologické údaje do reálnych misií, vďaka čomu sme schopní získavať údaje o reakciách operátorov v reálnom čase a predchádzať chybám ešte pred ich vznikom,
- psychofyzologické faktory v rozhodovaní – tento prístup dopĺňa tradičné metodiky o psychofyzologické aspekty, vďaka čomu sme schopní získať hlbší pohľad do rozhodovacích procesov operátorov,
- preventívna analýza a adaptácia – vďaka návrhu, resp. po jeho úprave zavádzame mechanizmy slúžiace na včasnú detekciu a prevenciu chýb, čím znižujeme riziko zlyhaní počas kritických fáz misie. Hovoríme teda o proaktívnom prístupe, ktorý umožní adaptáciu systému na základe aktuálneho stavu operátora (hlavný rozdiel oproti tradičným prístupom).

Zavedenie danej metodiky prináša zlepšenie efektivity a bezpečnosti operácií UAV, pretože poskytuje nielen hodnotenie technických faktorov, ale aj kontinuálne sledovanie mentálnych a psychofyzologických stavov operátorov, vďaka čomu sa optimalizuje riadenie UAV počas reálnych misií.

7. Záver

Štúdia sa zaoberá vplyvom ľudského faktora na riadenie bezpilotných lietadiel (UAV) a navrhuje opatrenia na zníženie rizík vyplývajúcich z ľudských chýb pri ich prevádzke. S rastúcim využitím UAV v rôznych oblastiach – od komerčných a záchranných misií po vojenské operácie – je kľúčové zabezpečiť efektívne riadenie, pričom operátor zohráva rozhodujúcu úlohu. Dôraz sa kladie na potrebu systémového prístupu k tréningu, príprave a hodnoteniu operátorov, s cieľom minimalizovať zlyhania spôsobené stresom, nedostatočným výcvikom alebo nesprávnym rozhodnutím.

Na základe teoretických poznatkov a vlastného výskumu boli identifikované faktory, ktoré ovplyvňujú výkon operátora UAV, najmä schopnosť zvládať stresové situácie, úroveň tréningu, prístup k spätnej väzbe a definované operačné postupy. Na základe týchto zistení boli navrhnuté opatrenia na elimináciu negatívnych vplyvov ľudského faktora.

Kľúčovým návrhom je zavedenie povinného praktického výcviku s progresívnou štruktúrou. Základný výcvik začína 3 hodinami na simulátore, pričom v prípade zložitejších misií môže dosiahnuť až 15 hodín. Tento výcvik by mal zahŕňať simulácie kritických situácií ako výpadky spojenia, náhle zmeny počasia či technické poruchy. Okrem toho sa odporúča zavedenie systému úrovní, kde operátor postupuje na vyššiu úroveň až po úspešnom zvládnutí predchádzajúcej.

Dôležitým prvkom je aj revízia štandardných operačných postupov (SOP), ktoré by mali lepšie zohľadňovať limity ľudských schopností a psychickú odolnosť. Rovnako je potrebné upraviť letové manuály tak, aby podporovali rýchle rozhodovanie v kritických situáciách.

Navrhuje sa tiež zavedenie tréningových programov na zvládanie stresu, ktoré zvyšujú odolnosť operátorov voči psychickej záťaži a zlepšujú rozhodovanie pod tlakom. Feedbackové mechanizmy v reálnom čase poskytujú operátorovi okamžitú spätnú väzbu a pomáhajú pri kontinuálnom zlepšovaní výkonnosti.

Na dlhodobú optimalizáciu prevádzky sa odporúča zavedenie metodiky na analýzu a vyhodnocovanie chýb operátorov UAV, čím sa identifikujú najčastejšie príčiny zlyhaní a prijímajú opatrenia na ich elimináciu.

Tieto návrhy prispievajú k bezpečnejšiemu a profesionálnejšiemu riadeniu UAV a sú kľúčové v kontexte rastúceho využívania týchto systémov. Výsledky môžu slúžiť ako základ pre ďalší výskum a prax v oblasti riadenia bezpilotných systémov.

PodĎakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: "Výskum a vývoj bezkontaktných metód pre získavanie geopriestorových údajov za účelom monitoringu lesa pre zefektívnenie manažmentu lesa a zvýšenie ochrany lesov", kód ITMS 313011V465, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Referencie

- [1] Indeed Editorial Team. 2025. *What is Cognitive Ability?* Online. In: Ca indeed. 28.03.2025. Dostupné na: <https://ca.indeed.com/career-advice/career-development/cognitive-ability> [citované 2025-02-21].
- [2] SWELLER, John. (2011). *Cognitive Load Theory*. Online. In: ScienceDirect. 2011. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/topics/neuroscience/cognitive-load> [citované 2025-02-21].
- [3] HAWTHORNE, Benjamin S., Dianne A. VELLA-BRODRICK a John HATTIE. (2021) *Well-Being as a Cognitive Load Reducing Agent*. Online. In: *Frontiers in Education*. Dostupné na: <https://doi.org/10.3389/feduc.2019.00121>. [citované 2025-02-21].
- [4] GINNS, Paul. (2006). *Integrating information: A meta-analysis of the spatial contiguity and temporal contiguity effects*. Online. In: Learning and Instruction. 2006. Dostupné na: [doi:10.1016/j.learninstruc.2006.10.001](https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.10.001). [citované 2025-02-21].
- [5] MAYER, Richard E. (2009). *Multi-media Learning*. Online. In: Cambridge University Press. ISBN 978-0-511-50070-1. [citované 2025-02-21].
- [6] SHENDE, Shradda, MUDAR, Raksha. (2023). *Cognitive Control in age-related hearing loss*. Online. In: ScienceDirect. 2023. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/topics/neuroscience/cognitive-flexibility> [citované 2025-02-21].

- [7] SOMMON, B, DEHAIS, F. (2022). Ecological Measures of cognitive impairments in aeronautics: theory and application. 2022. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/neuroergonomics> [citované 2025-02-21].
- [8] LAJDOVÁ, Andrea, LIPTÁKOVÁ, Karin. (2011). *Definícia stresu*. Online. In: Truni. Dostupné na: [https://fzsp.truni.sk/sites/default/files/dokumenty/e-kniznica/e-ucebnice/Ošetrovateľstvo-1_frameset%20-%20EPSTRUNI%20\(HTML\)/data/9a9df669-a400-45d0-9314-87d3fbd0c272a.html?ownapi=1](https://fzsp.truni.sk/sites/default/files/dokumenty/e-kniznica/e-ucebnice/Ošetrovateľstvo-1_frameset%20-%20EPSTRUNI%20(HTML)/data/9a9df669-a400-45d0-9314-87d3fbd0c272a.html?ownapi=1) [citované 2025-02-21].
- [9] JENSEN, Arthur R. (2006). *Reaction Time and Movement Time*. Online. In: ScienceDirect. 2006. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/reaction-time> [citované 2025-02-21].
- [10] Blackberry. (2024). *What is situational awareness?* Online. In: Blackberry. 2024. Dostupné na: <https://www.blackberry.com/us/en/solutions/critical-event-management/situational-awareness> [citované 2025-02-21].
- [11] Lark. (2024). *Biological Feedback: Understanding its Impact on Productivity*. Online. In: Lark. 2024. Dostupné na: https://www.larksuite.com/en_us/topics/productivity-glossary/biological-feedback [citované 2025-02-21].
- [12] SCHWARZ, David (2010). *Využití bezpilotných létajících prostředků pro telemetrické účely – telemetrický systém*. Ostrava. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. [citované 2025-02-21].
- [13] BARNEY, Nick. (2022). *Telemetry*. Online. In: TechTarget. 2022. Dostupné na: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/telemetry> [citované 2025-02-21].
- [14] VASYLENKO, Mykola. (2018). *Telemetry system of Unmanned Aerial Vehicles*. Online. In: Researchgate. 2018. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/330963224_TELEMETRY_SYSTEM_OF_UNMANNED_AERIAL_VEHICLES [citované 2025-02-21].
- [15] KADLEC, Roman. (2023). *Variabilita srdcového tepu (HRV): Prečo je dôležitá a ako si ju merať pomocou Garmin hodín*. Online. In: Touchit. Dostupné na: <https://touchit.sk/variabilita-srdcoveho-tepu-hrv-garmin-hodinky/666232> [citované 2025-02-21].
- [16] NHS. (2017). *Electroencephalogram (EEG)*. Online. In: NHS. 2017. Dostupné na: <https://www.nhs.uk/conditions/electroencephalogram/> [citované 2025-02-21].
- [17] ChooseMuse. (2024). *Muse: the brain sensing headband*. Online. In: Muse. 2024. Dostupné na: https://choosemuse.my.site.com/s/?language=en_US [citované 2025-02-21].