



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 sensorov, 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, MALSR 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 svietivosť, 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 Gaulle** 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 hodnotiacia 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)	Stredne 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 prispôbena 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: Porovnanie 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; Subjektívna 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 výhradami. 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 svietivosti dráhových svetiel

Tabuľka 3: Porovnanie tradičnej metódy a UAV riešenia pri meraní svietivosti 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 svietivosti	±3%	±5%
Náklady na jedno meranie kompletného systému	1500-2200 €	600-800 €
Komplexnosť údajov	Individuálne svetlá	Kompletná mapa svietivosti 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 rádionavigačných 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 kalibrácii 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/km ²)	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 ciele 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 flexibilitate 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 (zoraďené podľa vhodnosti):

1. Inšpekcia budov a technologických celkov (4,14/5) – vysoká vhodnosť
2. Meranie svietivosti 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 svietivosti 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 efektivitu 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 svietivosti 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 svietivosti 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 analýzy 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 efektivite, 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.

Pod'akovanie

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>.