



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 navrhnúť, 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 navrhnúť, 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 rovnovahu 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 (akrylonitrilbutadiénstyrén), PETG (glykol-modifikovaný polyester), PLA (polylaktid), ASA (akrylonitril-styrén-akrylát) a nylon. Tieto materiály sa vyznačujú rôznymi pevnosťmi 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 kufroch 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 polyetylentereftalát, 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 tlačiarmi 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

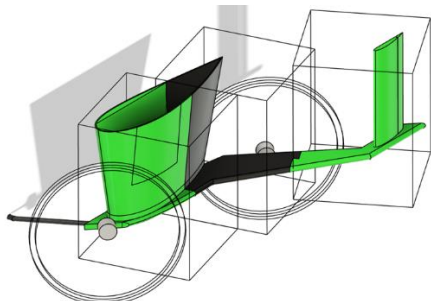
Trup a chvostové plochy lietadla boli vyrobené pomocou 3D tlače, zatiaľ čo krídla boli zhotovené ručne rezaním polystyrénu a následným potiahnutím balzou. Pri navrhovaní 3D tlačeného lietadla je dôležité zohľadniť orientáciu vrstiev, keďže táto vlastnosť výrazne ovplyvňuje pevnosť, pružnosť a odolnosť častí. Vzhľadom na to, že väčšina 3D tlačiarní 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, potrebu 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 nanosenie 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 poťahom a vystužené jedným nosníkom, ktorý prenáša hlavné zaťaženie a zabezpečuje mechanickú odolnosť konštrukcie. Poťah 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 efektívnosť. Majú fungovať ako násady, do ktorých sa krídla zasunú a chránia konce krídiel pred odlepovaním fólie a proti natrhnutiu a šíreniu trhlin.

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]

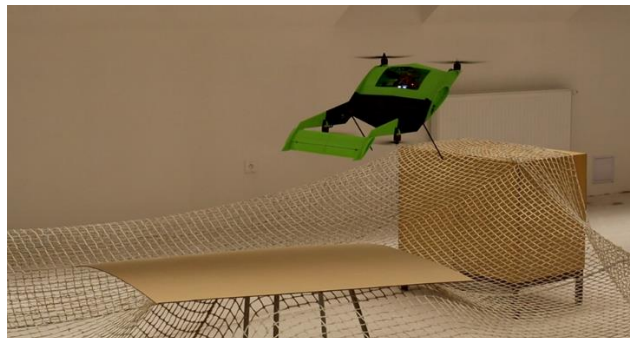
Na spomalenie pádu lietadla a zníženie nárazovej sily pri kontakte so zemou sú použité oceľové ťažné pružiny, na ktorých je upevnená sieť. Pružiny sú umiestnené na oceľových roxoroch. Do zostavy patrí desať týchto oceľových tyčí, ktoré sú farebne kontrastné biele a červené. Toto umožňuje pilotovi RC 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 vrtúľ 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 vrtúľ 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 Janíkovec 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 vysielaci. 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 multikoptéroch. 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 napláňovať ďalšie testovacie lety koncom mesiaca máj 2025.

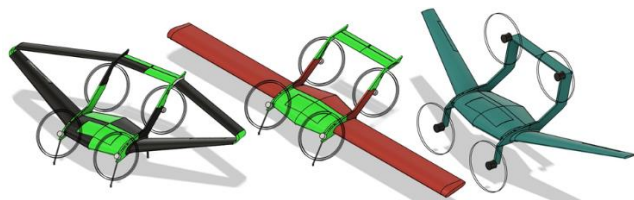


Obrázok 4 UAS V2 pri testovaní [zdroj: autor]

9. ĎALŠIE PORKAČOVANIE VÝVOJA

Letún by sa mohol ďalej vyvíjať aj inými spôsobmi. Navrhujeme ďalšie dva možné varianty. Prvý variant by sa zamerlal 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 nakloniť do 40° a následne zvyšovať rýchlosť, v prípade tejto verzie by bolo potrebné nakloniť 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 vzlaku 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 kvadroptéry 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.

Pod'akovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA Q24ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

- [1] STŘÍTENSký, 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/>>