



# AUTOMATICKÝ BEZPILOTNÝ KLZÁK AKO NOSIČ AEROLOGICKÝCH SOND

Samuel Michal Kapustík  
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

Unmanned aerial vehicles are increasingly being used to make our lives more enjoyable and easier, whether through the ability to capture key moments in our lives in high definition, or by automatically mapping hard-to-reach terrain, or even significantly assisting in the search for missing persons. This thesis discusses and approaches the possible expansion of the usability of unmanned flying vehicles, along with a proposal to create a more economical and environmentally friendly way of using aerological probes, such as the Vaisala RS41, to provide us with invaluable data needed to create accurate weather forecasts. Furthermore, the procedure for setting up such an unmanned flying vehicle using an advanced autopilot system is explained, and this thesis also includes specific results achieved in the experimental work associated with it. With the proposed solution, it will be possible to use the funds allocated to meteorological research and measurements more efficiently.

## Keywords

Unmanned aerial vehicles. Meteorology. Glider. Aerological probe.

## 1. Úvod

V 21. storočí sme svedkami neustáleho technologického pokroku vo všetkých odvetviach, ako je medicína, letectvo, informačné technológie, stavebníctvo a ďalšie, najmä v oblasti UAV. Tento pokrok prináša nielen pozitíva, ale aj negatívne dopady, najmä na životné prostredie. Bezpilotné lietajúce prostriedky (UAV) sa využívajú komerčne na fotogrametriu, meranie v stavebníctve, záchranné akcie, doručovanie krvi na transfúziu [4], a vo vojenských účeloch. V súkromnej sfére slúžia na rekreačné účely, alebo na fotografovanie a natáčanie videí. Tento článok sa zameriava na návrh technologického riešenia pre automatický bezpilotný klzák, ktorého funkcia je byť nosičom pre aerologickú sondu vykonávajúcu prierezové meranie rôznych aspektov atmosféry a napokon túto sondu bezpečne doručiť na miesto pôvodného vzletu, respektíve do inej vhodnej lokality na pristátie. Nakoniec hodnotí a prezentuje výsledky experimentov.

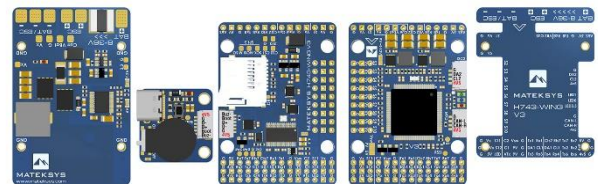
## 2. Metodika a metódy skúmania

Pri experimentálnej činnosti zaoberajúcej sa vyššie spomínanou problematikou bolo nutné stanoviť si základné okruhy alebo segmenty výskumu a následne navrhnuť riešenia na existujúce problémy. Experimentálna činnosť ako celok bola rozdelená na nasledujúce segmenty: letový počítač, softvérové vybavenie, konfigurácia a kalibrácia letového počítača, montáž letového počítača a experimentálne overenie funkčnosti navrhnutého systému.

### 2.1. Letový počítač

Medzi jednoduchým RC modelom lietadla a pokročilým bezpilotným lietajúcim prostriedkom, ktorý môže vykonávať rôzne úlohy a misie, je hlavný rozdiel v letovom počítači. Tento letový počítač je nevyhnutnou súčasťou každého bezpilotného lietajúceho prostriedku, ktorý má operovať samostatne. Trh je aktuálne preplnený rôznymi typmi letových počítačov s

rozličnými vlastnosťami, senzormi, výkonovými charakteristikami a cenami. Väčšina týchto počítačov sa vyrába v Ázii kvôli nízkym výrobným nákladom a dobrej výrobnej infraštruktúre. Pri výbere letového počítača pre túto experimentálnu činnosť bolo nutné zvážiť rôzne možnosti. Do finálneho výbaru sa dostali letové počítače Pixhawk6x a Mateksys Matek H743-WING V3. Obe majú vysoký výkon, možnosť pripojenia senzorov a ďalších komponentov. Nakoniec bol vybraný model Mateksys Matek H743-WING V3 kvôli lepšej podpore, nižšej cene, dostupnosti senzorov a jednoduchšej konfigurácii vďaka open-source operačnému systému.



Obrázok 1. Letový počítač Matek H743-WING V3. Zdroj: <https://www.mateksys.com/> [1]

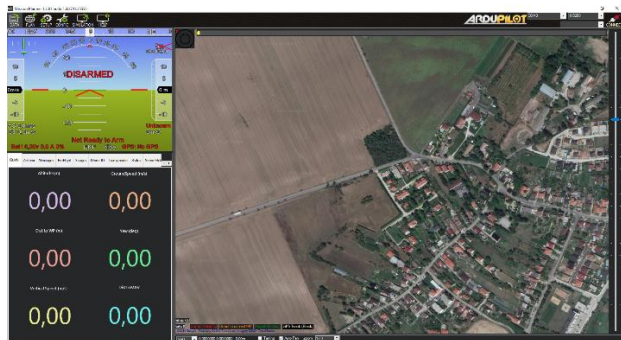
Hlavné výhody tohto letového počítača spočívajú v jeho kompaktných rozmeroch (54 mm x 36 mm x 13 mm) a nízkej hmotnosti (30 gramov). Obsahuje procesor STM32H743VIT6 s frekvenciou 480 MHz a 2 MB pamäťou. Súčasťou je aj slot na pamäťovú kartu pre záznam údajov, 7 UART IO slotov, 2 I2C sloty, 1 CAN slot, 3 SPI3 konektory a OSD čip. Poskytuje 6 vstupov pre letové dáta ADC (Air Data Computer) na meranie rôznych parametrov ako napätie, prúd, teplotu a tlak. S podporou až 2 videosignálov a 2 napájacích výstupov (5V, 9V, 12V) umožňuje pripojenie a napájanie rôznych komponentov. Je napájaný pomocou distribučnej dosky PDB, ktorá zabezpečuje správne napájanie jednotlivých komponentov. Má tiež senzory prúdu s kalibrovanou presnosťou do 90 A a možnosťou krátkodobého zvýšenia na 220 A. Dokáže riadiť až 13 servomotorov a má minimálnu prevádzkovú teplotu -60 °C, čo

umožňuje jeho použitie aj v extrémnych podmienkach [1]. Na rozdiel od konkurenčného počítača Pixhawk 6X, ktorý nie je vhodný pre prevádzku pri takýchto nízkych teplotách.

## 2.2. Softvérové vybavenie

Na zabezpečenie správneho fungovania pozemnej riadiacej stanice a konfigurácie letového počítača bezpilotného lietajúceho prostriedku je potrebné mať sofistikovaný softvér, ktorý plní tieto úlohy a poskytuje užívateľské rozhranie (GUI). Na tento účel sme zvolili Mission Planner, ktorý slúži ako konfiguračný nástroj pre letový počítač a jeho komponenty a tiež ako hlavný softvér pre pozemnú riadiacu stanicu. Ako operačný systém je použitý ArduPilot, ktorý je nainštalovaný priamo do letového počítača a zabezpečuje spracovanie všetkých letových údajov z pripojených komponentov, stabilizáciu lietajúceho prostriedku a riadenie jeho letu.

Mission Planner, ktorý bol vytvorený v roku 2010, je sofistikovaný open source softvér, ktorý umožňuje používateľom voľne upravovať a konfigurovať parametre UAV. Bol vytvorený a je stále spravovaný Michaelom Osborneom s cieľom uľahčiť konfiguráciu a plánovanie misí pre rôzne druhy bezpilotných prostriedkov. Tento softvér sa zameriava na jednoduchosť, flexibilitu a efektivitu a poskytuje množstvo komplexných funkcií, ktoré umožňujú autonómnu prevádzku týchto prostriedkov v rôznych situáciách. Okrem amatérov ho často využívajú aj komerčné a profesionálne subjekty. Mission Planner má prehľadné užívateľské rozhranie, ktoré umožňuje jednoduché nastavenie letového počítača a parametrov misie a simuláciu letu. Základné zobrazenie poskytuje dôležité informácie o lete a varuje v prípade porúch letového počítača alebo ovládacieho softvéru [2].



Obrázok 2. Základné užívateľské rozhranie softvéru Mission Planner

ArduPilot a jeho verzia ArduPlane sú open source softvéry, ktoré vznikli v roku 2007 s cieľom poskytnúť cenovo dostupné technologické riešenie pre autonómne lety bezpilotných lietajúcich prostriedkov, teda tento softvér poskytuje funkciu autopilota. Aktívna komunita používateľov a vývojárov sa stará o neustále vylepšovanie softvéru a jeho bezchybné fungovanie. ArduPilot umožňuje ovládanie bezpilotných prostriedkov rôznych rozmerov a hmotností. Môže riadiť rôzne príslušenstvo, ako sú svetlá, motory, servomotory a ďalšie komponenty a takisto zapisuje všetky letové údaje a chyby pre následnú analýzu. Jeho široká užívateľská základňa zabezpečuje prístup k podrobným návodom a vysvetleniam potrebným na plnohodnotné využitie softvéru [3].

## 2.3. Konfigurácia a kalibrácia letového počítača

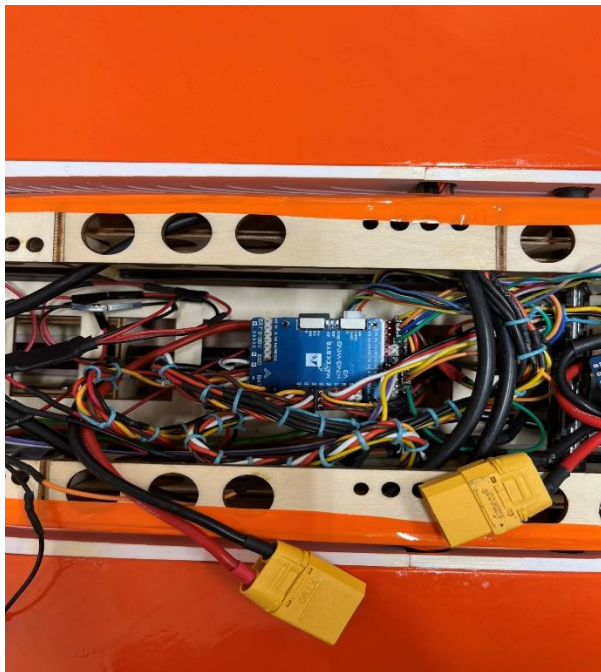
Kalibrácia letového počítača a jeho príslušenstva je kľúčovým krokom pri vytváraní funkčného bezpilotného lietajúceho prostriedku s optimálnymi letovými vlastnosťami. Bez správnej kalibrácie by aj najlepšie nastavenia ostatných parametrov nedokázali zabezpečiť správne fungovanie tohto prostriedku. Kalibrácia letového počítača pred montážou do bezpilotného lietajúceho prostriedku nie je žiaduca, nakoľko na jej úspešné uskutočnenie je nutné, aby letový počítač bral do úvahy aj nepriaznivé elektromagnetické podmienky v bezpilotnom lietajúcom prostriedku vytvorené prúdením elektrického prúdu v kabeláži alebo metalickými časťami jeho konštrukcie. Kalibrácia musí prebiehať s pripojenou batériou a ostatným elektronickým vybavením, aby sa vykompenzovali rušivé magnetické polia vytvárané elektrickým prúdom. Kalibrácia akcelerometrov je kritická pre presné určenie polohy a náklonu lietadla. Viacero akcelerometrov sa používa pre redundanciu a presnejšie merania. Proces kalibrácie prebieha vo viacerých cykloch, kde sa určuje východzia poloha akcelerometrov v rôznych osiach. Kalibrácia magnetometra je dôležitá pre určenie magnetického smerovania bezpilotného lietajúceho prostriedku. Pre multikoptéry alebo VTOL bezpilotné prostriedky je táto kalibrácia kritickejšia, pretože GPS senzor nemôže presne vypočítať magnetický smer, keď bezpilotný lietajúci prostriedok visí vo vzduchu. Pri bezpilotných lietajúcich prostriedkoch vyžadujúcich k letu dopredný pohyb, ako je tom v prípade automatického klzaku dokáže GPS senzor počas pohybu vpred vypočítavať magnetické smerovanie. Proces kalibrácie magnetometra zahŕňa rotáciu bezpilotného lietajúceho prostriedku o 360 stupňov v rôznych polohách. Všetky tieto kroky kalibrácie sú nevyhnutné pre zabezpečenie presných a spoľahlivých letových dát, ktoré sú kľúčové pre bezpečnú prevádzku.

## 2.4. Montáž letového počítača

Pred samotnou montážou letového počítača je dôležité urobiť niekoľko rozhodnutí, ktoré môžu výrazne ovplyvniť letové vlastnosti. Medzi tieto rozhodnutia patrí umiestnenie počítača a jeho súčiastok, ako aj ich orientácia. Aby sme zistili optimálne umiestnenie počítača, je potrebné pochopiť, ako stabilizačný proces v letovom počítači funguje. Počítač stabilizuje bezpilotný lietajúci prostriedok pomocou ovládacích prvkov alebo zmenou ťahu motorov tak, aby udržoval akcelerometre a gyroskopy v prednastavenej polohe. Preto je dôležité umiestniť počítač čo najbližšie k ťažisku lietadla, aby bolo možné správne vyhodnocovať jeho polohu a minimalizovať potrebu korekcií počas letu. Pri montáži letového počítača do bezpilotných lietajúcich prostriedkov s pohonom, či už elektrickým alebo spaľovacím, alebo do lietadiel lietajúcich vo vysokých rýchlostiach, je dôležité minimalizovať prenos vibrácií do počítača. To možno dosiahnuť použitím anti-vibračných materiálov, ako sú penové podložky, ktoré dokážu absorbovať vibrácie. Priamo uchytený počítač by mohol absorbovať nežiaduce vibrácie, čo by mohlo viesť k nesprávnym korekciám a problémom pri ovládaní bezpilotného lietajúceho prostriedku, v extrémnych prípadoch k jeho havárii. V rámci experimentovania boli testované rôzne spôsoby montáže letového počítača na bezpilotný lietajúci prostriedok, vrátane tuhého uchytenia a použitia anti-vibračných materiálov ako gumové podložky, penové podložky, suchý zips a polystyrén. Zistilo sa, že príliš tuhé uchytenie prenáša do letového počítača príliš veľa vibrácií, ktoré nie je schopný filtrovať. Naopak, príliš

mäkké uchytenie spôsobuje príliš voľný pohyb letového počítača, čo vedie k nesprávnym korekciám. Optimálnym materiálom pre uchytenie letového počítača sa ukázala byť pena molitanového typu, ktorá má schopnosť absorbovať vibrácie a zároveň poskytuje dostatočnú stabilitu pre správne fungovanie letového počítača.

Ďalším dôležitým rozhodnutím pri montovaní letového počítača a ďalších komponentov do bezpilotného lietadla je zabezpečenie ich ľahkej dostupnosti v prípade potreby údržby, opravy alebo úpravy. Taktiež je kľúčové zvážiť množstvo použitej kabeláže na prepojenie týchto komponentov. Nesprávne umiestnenie môže spôsobiť značné ťažkosti v prevádzke celej sústavy a spomaliť pokrok v experimentálnych alebo výskumných aktivitách, pretože je malá pravdepodobnosť, že systém bude fungovať bez problémov v pôvodnej konfigurácii. Je nevyhnutné zabezpečiť optimálnu dostupnosť a vytvoriť dostatok servisných otvorov, pričom je dôležité neoslabiť konštrukciu lietadla. Ďalším problémom je nadmerné množstvo kabeláže potrebnej na prepojenie rôznych komponentov s letovým počítačom alebo batériou. To zvyšuje hmotnosť a negatívne ovplyvňuje letové vlastnosti a dobu letu.



Obrázok 3. Uloženie letového počítača v automatickom klzáku

## 2.5. Experimentálne overenie funkčnosti navrhnutého systému

Testovanie funkcionality letového počítača na zmenšenom modeli klzáku v nižších výškach má za úlohu overiť nastavenie parametrov letového počítača a jeho schopnosť pracovať efektívne v reálnych podmienkach pri použití na plnom rozsahu klzáku. Na tento účel boli uskutočnené viaceré letové testy, pri ktorých bol zmenšený model klzáku pripojený k inému bezpilotnému lietajúcejmu prostriedku, konkrétne k kvadrokoptére, a bol vynesенý do nižšej výšky. Po dosiahnutí tejto výšky bol zmenšený klzák ručne spustený a najskôr riadený manuálne, až kým nepristál, a neskôr bol pilotovaný automaticky. Tento zmenšený model klzáku zachováva rovnakú koncepciu ako klzák v plnej veľkosti, čo zahŕňa delta krídlo s

kombinovanými riadiacimi plochami, nazývanými elevony. Testovanie prebehlo počas troch dní. Pri testovaní boli použité rôzne letové režimy, konkrétne manuálny, FBWA a RTL. V manuálnom režime pilot priamo ovláda riadiace plochy lietajúceho prostriedku bez akýchkoľvek stabilizačných funkcií letového počítača. V režime FBWA letový počítač stabilizuje náklon a klopenie lietadla na základe pokynov pilota, ktorý určuje požadovaný uhol náklonu a letový počítač sa snaží udržať tento uhol pomocou riadiacich plôch. V režime RTL letový počítač naviguje lietajúci prostriedok späť na miesto štartu pomocou GPS a riadi ďalšie bezpečnostné funkcie, ako napríklad automatické otvorenie padáku pri dosiahnutí prednastavenej výšky.



Obrázok 4. Zmenšený model klzáku pred zahájením letových testov

Prvý deň testovania letového počítača na menšom modeli klzáku začal so štandardnými nastaveniami letového počítača bez dodatočnej úpravy. Testy prebiehali v manuálnom režime a v stabilizovanom móde FBWA, kde letový počítač zabezpečoval stabilizáciu lietajúceho prostriedku, pričom riadenie trajektórie bolo na pilotovi. Údaje z týchto testov sa zaznamenávali len na zemi cez telemetriu. Počas prvého testovacieho letu bol klzák vynesенý do výšky približne 60 metrov a potom manuálne vypustený. Počas letu bol počítač v manuálnom móde riadenia. Hoci klzák nedosiahol dostatočný vztlak a stabilizáciu potrebnú na kontrolu letu, bolo po jednoduchých opravách možné pokračovať v testovaní. Druhý, tretí a štvrtý test boli vykonané v režime FBWA z vyšších výšok, 100 a 140 metrov. Hoci došlo k osciláciám kvôli citlivému nastaveniu stabilizačného algoritmu a slabšej konštrukcii, klzák bol stále ovládateľný. Po prvom dni testovania bolo rozhodnuté znížiť citlivosť stabilizačného algoritmu a posilniť konštrukciu klzáku. Telemetrický a RC systém fungoval spoľahlivo počas celého dňa.

Pred začatím druhého dňa testovacieho boli prijaté opatrenia na základe skúseností z predchádzajúceho dňa, ktoré zahŕňali upravenie citlivosti stabilizačného algoritmu a zosilnenie štruktúry modelu klzáku. Všetky testovacie lety v druhý deň boli realizované v móde FBWA s cieľom odstrániť oscilácie počas letu klzáku. Počas druhého dňa bolo vykonaných niekoľko letových testov, pričom tri z nich, podľa telemetrických údajov, vynikali najviac v redukcii oscilácií. Tieto lety boli realizované vo výškach



130 m, 100 m a opäť 130 m, pričom pilot sa snažil udržať podobnú trajektóriu pri každom testovacom lete. Napriek pokusom o zníženie citlivosti stabilizačného algoritmu, oscilácie pretrvávali najmä pri vyšších rýchlostiach. Pri nižších rýchlostiach dochádzalo k poklesu oscilácií, ale kvôli blízkosti pádovej rýchlosti klzáku sa prejavovala tendencia k špirálovému pádu po strate vztľaku na jednom krídle. Manipulácia s ťažiskom klzáku ovplyvnila oscilácie a letové vlastnosti len minimálne.

Počas posledného letového dňa boli letové dáta zaznamenávané nielen telemetricky, ale aj priamo na SD kartu v letovom počítači, čo zabezpečilo presnejšie údaje a zvýšilo počet zaznamenávaných parametrov. Testovacie lety v tomto dni boli vykonané z vyššej výšky ako predchádzajúce dni. Okrem toho bol otestovaný aj režim RTL, ktorý sa má využívať pri testovaní klzáku v plnej veľkosti. Prvý letový test v tomto dni bol vykonaný z výšky 170 m v móde FBWA, pri ktorom pilot vykonal jednu ľavotočivú zatáčku a úspešne pristál. Druhý let dosiahol výšku 193 m a bol prvým, kde sa použil režim RTL. Klzák nasledoval plánovanú trajektóriu a bezpečne pristál. Ďalšie dva letové testy boli opäť v móde FBWA z výšok 160 m a 170 m a pilot pristál s klzákom v oboch prípadoch úspešne. Najdôležitejší let v tomto dni bol posledný, počas ktorého sa klzák dostal do nekontrolovateľného letového stavu, konkrétne do vývrtky. Tento let bol uskutočnený v móde FBWA. Približne v polovici letu sa klzák dostal do nekontrolovateľného stavu a po zrážke so zemou utrpel poškodenia, ktoré znemožnili ďalšie testy. Možné príčiny zahŕňajú zhoršené meteorologické podmienky počas vykonávania letového testu s vysokou rýchlosťou nárazov vetra, oscilácie a opotrebenie klzáku po viacerých testoch v tom istom dni.



Obrázok 5: Zmenšený model klzáku po havárii

### 3. Výsledky

Nastavenie letového počítača na základe letových testov je zložitý proces, ktorý si vyžaduje veľa času a opakované úpravy parametrov. Po vyhodnotení výsledkov troch dní letov s menším modelom automatického bezpilotného klzáku je jasné, že budú potrebné ďalšie testy pred tým, než sa môžu začať letové testy s klzákom v plnej mierke. Aj napriek niektorým negatívnym výsledkom je pokrok v letových testoch zjavný. Nasledujúcimi krokmi pred začatím ďalšej fázy letových testov bude úprava tvaru a konštrukcie menšieho modelu klzáku pre lepšiu

aerodynamiku, testovanie stabilnejšej polohy ťažiska a nastavenie stabilizačného algoritmu. Navyše, bude do menšieho modelu klzáku implementovaný automatizovaný mechanizmus na otvorenie padáku pri určenej výške, pomocou tzv. LUA skriptov. Tento postup by mal optimalizovať letové charakteristiky klzáku a umožniť nastavenie parametrov vhodných pre klzák plnej veľkosti.

### 4. Záver

Vzhľadom na náročnosť experimentálnej práce z hľadiska času, technických aspektov a legislatívy sa v čase publikácie tohto článku nepodarilo uzavrieť túto aktivitu s definitívnymi výsledkami. Táto situácia však otvára priestor pre ďalší vývoj v rámci celého výskumného tímu a spolupráce s ďalšími kolegami pri realizácii letových testov s plnohodnotným klzákom, ktorý bude vybavený viacerými prístrojmi a senzormi vrátane aerologickej sondy a dosiahne stratosférické výšky. Získané dáta z týchto testov budú dôležité pre finálnu úpravu a konfiguráciu klzáku pripraveného na reálnu prevádzku. Ak budú výsledky nasledujúcich testov úspešné, zväží sa možnosť uvedenia tohto technologického riešenia na komerčný trh, pričom sa očakáva, že takto získané údaje z aerologických sond poskytnú ekonomicky a ekologicky výhodný spôsob získavania atmosférických meraní.

### Referencie

- [1] MATEKSYS. Flight Controller H743-WING V2 and V3. Dostupné na internete: <https://www.mateksys.com/?portfolio=h743-wing-v2#tab-id-2> (cit. 2024-03-15)
- [2] Mission Planner Overview. Dostupné na internete: <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html> (cit. 2022-04-05)
- [3] ArduPilot - ArduPlane. Dostupné na internete: <https://ardupilot.org/plane/index.html> (cit. 2022-04-05)
- [4] ROSEN, J. W. 2017. Zipline's Ambitious Medical Drone Delivery in Africa. Dostupné na internete: <https://www.technologyreview.com/2017/06/08/151339/blood-from-the-sky-ziplines-ambitious-medical-drone-delivery-in-africa/> (cit. 2022-03-21)