

# RIEŠENIE VTOL PRE UAV S FIXNÝMI NOSNÝMI PLOCHAMI

## SOLUTION OF VTOL FOR UAV WITH FIXED BEARING SURFACES

**Tomáš Sisák**

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia  
sisak@stud.uniza.sk

**Filip Škultéty**

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia  
filip.skultety@fpedas.uniza.sk

**Abstract** – This paper focuses on solving the problem of vertical takeoff and landing of an unmanned aerial vehicle with fixed bearing surfaces. The introduction describes the two most commonly used types of UAVs, emphasizing the positive and the negative properties of the UAVs. Furthermore, the work describes vertical takeoff and landing of aircraft and the design of the arrangement of airfoils and fuselage for individual UAV. The next chapter focuses on the selection of correct material and the process of building a UAV. The following chapter is devoted to the used electronics, describing each component separately, but at the same time, describing the electronic components necessary for the vertical takeoff and landing of the so-called pixhawk precisely. The main idea is to introduce the functioning of the sole component and the correct setting using a computer program. At the end of the work, there are calculations that are necessary to determine the operating values such as the speed range and the multiples for safe operations of the UAVs. These calculations are obtained computationally but also by simulation, using the XFLR5 program. With the help of this paper, reader can build, set up and fly with an unmanned aerial vehicle with fixed surfaces and vertical takeoff and landing by himself.

**Key words** – Drone. UAV. VTOL. Unmanned aerial vehicle. Pixhawk. Vertical take-off and landing.

### I. ÚVOD

Témou diplomovej práce je riešenie vertikálneho vzletu a pristátia pre UAV s fixnými nosnými plochami.

Existuje celá rada bezpilotných leteckých prostriedkov. Rozdeliť ich možno do dvoch základných skupín. Bepilotné letecké prostriedky s fixnými nosnými plochami a bepilotné letecké prostriedky s rotujúcimi nosnými plochami. Práve tie s rotujúcimi nosnými sú menej využívané hlavne pri dlhších letoch, ako je tomu napríklad počas armádneho využitia alebo mapovaní veľkých území. Hlavným nedostatkom tohto typu dronov v porovnaní s bepilotnými prostriedkami s fixnými nosnými plochami je práve menší dolet. Naopak drony s fixnými nosnými plochami vyžadujú komplikovanejšie podmienky pre vzlet a pristátie.

Táto diplomová práca je zameraná na kompletnú stavbu, nastavenie a konfiguráciu dronu s fixnými nosnými plochami a možnosťou využívať vertikálny vzlet a pristátie. Práve takýto typ dronu rieši nedostatky spojené s krátkym doletom UAV s rotujúcimi nosnými plochami a komplikovanosť vzletu UAV s fixnými nosnými plochami. Využíva len kladné vlastnosti oboch typov UAV. V prvej kapitole sú porovnané výhody a nevýhody oboch typov UAV. Nasleduje samotná stavba, použité materiály a skladba jednotlivých častí UAV – trup, krídlo, chvostové plochy. Pri použitej elektronike sú popísané všetky súčiastky využité v UAV – motor, regulátor, servá, batéria. Samostatnú kapitolu tvorí funkcia a nastavenie pixhawk, čo je elektronická súčiastka nevyhnutná pre vertikálny vzlet UAV. V závere práce sa čitateľ môže oboznámiť s hodnotami rýchlostí násobkov a uhlov nábehu, pri ktorých UAV dokáže operovať počas letu. Tieto údaje sú získané výpočtovo pomocou vzorcov ale aj simulované v počítačovej simulácii XFLR5. Pomocou tejto diplomovej práce dokáže čitateľ zhotoviť, nastaviť a lietať s bepilotným prostriedkom s fixnými plochami, ktorý využíva vertikálny vzlet a pristátie.

### II. POROVNANIE UAV S PEVNÝMI NOSNÝMI PLOCHAMI A UAV S ROTUJÚCIMI NOSNÝMI PLOCHAMI

#### **POROVNANIE UAV S PEVNÝMI NOSNÝMI PLOCHAMI**

UAV s pevným krídlom sa využívajú väčšinou v profesionálnej sfére, či už ide o presné topografické snímkovanie veľkých území s vysokým rozlíšením a vyhotovením 3D objektu alebo na vojenské účely.

Ak by sme v porovnaní s kvadroptérou (multikoptéra so štyrmi rotormi) hľadali výhody UAV s pevným krídlom išlo by hlavne o tieto výhody.

#### **Dlhší dolet**

UAV s pevnými nosnými plochami majú vďaka tvorbe vztlaku na krídlach a udržiavania dopredného horizontálneho letu len vďaka jednému motoru oveľa dlhší dolet. Takéto UAV dosahuje väčšie rýchlosti a dokáže na jedno nabitie batérií zaletieť a zmapovať oveľa väčšie územia. Dokáže zmapovať až tisíce metrov štvorcových na jedno nabitie, čo by s klasickou kvadroptérou vyžadovalo oveľa viac medzipristátí na dobitie alebo výmenu batérií [1].

### Dlhšia vytrvalosť letu

Dlhšia vytrvalosť letu podobne ako dolet súvisí s menšou spotrebou – len na jeden elektromotor a servá. Ostatná elektronika v UAV s pevnými plochami je porovnateľná s UAV kvadroptérou. Bežná vytrvalosť - výdrž batérií kvadroptéry sa obvykle pohybuje od 10 do 20 minút, pričom UAV podobných rozmerov a nosnosťou s pevnými nosnými plochami dokáže vydržať v horizontálnom lete 45 minút až hodinu [1].

### Kvalitnejšie mapovanie veľkých území

Vďaka absencii častých medzipristátí je snímok kvalitný bez akýchkoľvek prechodov. V prípade prerušenia záberu a následného pokračovania ako je to nutné pri nabíjaní kvadroptéry je snímok častokrát nekvalitný. Naopak pri snímokovaní menších plôch je UAV s pevnými nosnými plochami menej obratné a snímok je nekvalitný. Pri momentálnej legislatíve a možnosti letu UAV len do vzdialenosti 1000 m a na viditeľnosť UAV bude pre všeobecné využitie viac využívaná klasická kvadroptéra [1].

### Vyššia bezpečnosť letu

V prípade výpadku jedného motora (poškodenie vrtule) sa stáva UAV s pohyblivými nosnými plochami – ak ide napríklad o kvadroptéru úplne neovládateľnou. Šesť a viac ramenné UAV sú bezpečnejšie a dokážu častokrát bezpečne pristáť bez poškodenia. V dnešnej dobe sa používajú aj rôzne záchranné padáky. Ak systém vyhodnotí že UAV nie je schopný pokračovať v lete, vystrelí bezpečnostný padák [1].

Na druhej strane UAV s pevnými nosnými plochami dokáže aj bez ťahu motorov pokračovať a bezpečne pristáť kľzavým letom. Kľzavý let sa nepoužíva len v prípade výpadku motora ale aj pri snímokovaní zvuku. UAV dokáže bez hluku motorov nasnímkovať kvalitnejšie aj zvuk [1].

### POROVNANIE UAV S ROTUJÚCIMI NOSNÝMI PLOCHAMI

Naopak UAV s rotujúcimi nosnými plochami sú na rozdiel UAV s nosnými plochami využívanéjšie z nasledujúcich hľadísk.

### Jednoduchší vzlet a pristátie

Tento typ UAV podoba ako je to v leteckej pri vrtuľníku potrebuje na vzlet minimálnu plochu. Vzlet a pristátie je vertikálne, pričom väčšina UAV disponuje funkciou „return to home“ (návrat na vopred zvolené miesto) alebo funkciou „return to land“ (návrat na miesto vzletu). Pri UAV s pevnými nosnými plochami je vzlet a pristátie oveľa náročnejšie. Či už ide o veľkosť plochy využitej na vzlet alebo pristátie alebo spôsob vzletu a pristátia. Na vzlet potrebujú tieto UAV častokrát vzletovú rampu s voľným priestorom pred rampou alebo je samotný vzlet riešený z ruky pomocníka. Nevýhodou v tomto prípade je, že bezpilotný prostriedok vyžaduje náročnejšiu obsluhu a viacčlenný personál. Podobne je to aj s pristátím UAV s pevnými nosnými plochami. Je nutná dostatočná plocha bez prekážok (pristávacia dráha), keďže má UAV pri pristátí doprednú rýchlosť potrebnú na udržanie vztlaku [1].

### Lepšia manévrovateľnosť

UAV s rotujúcimi nosnými plochami nepotrebuje pre let doprednú rýchlosť, to umožňuje UAV rôzne režimy ktoré UAV s pevnými plochami nedokáže. Jednou z nich je aj režim visu. Pri tomto režime dokáže UAV nepretržite stáť na jednom mieste až po dobu vybitia batérií. Dá sa tak neustále monitorovať jeden objekt bez nutnosti pohybu UAV. Bezpilotný prostriedok s rotujúcimi nosnými plochami sa dokáže bez problémov otočiť okolo zvislej osi bez zmeny polohy, čo by UAV s pevnými plochami len sotva dokázal [1].

## III. POUŽITIE VERTIKÁLNEHO VZLETU PRE UAV

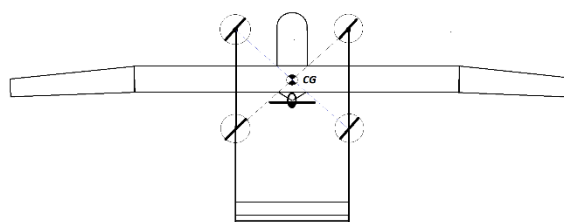
Pri navrhovaní samotného UAV sa brala do úvahy jednoduchosť systémov, hmotnosť a letové vlastnosti v horizontálnom lete UAV.

Pre vertikálny vzlet a pristátie bude využitý princíp vzletu a letu UAV.

Princíp letu UAV sa najjednoduchšie popisuje na kvadroptéru, pretože má štyri vrtule a štyri motory na štyroch rozličných ramenách. Každá z vrtúľ vytvára vztlak a zároveň krútiaci moment. Čiže ak sa vrtuľa otáča v smere hodinových ručičiek, tak potom podľa tretieho Newtonovho zákona bude mať rameno tendenciu otáčať sa v protismere. Toto je dôvod prečo klasické vrtuľníky potrebujú chvostový rotor. Avšak v prípade UAV sa používajú dve pravotočivé a dve ľavotočivé vrtule, umiestnené diagonálne proti sebe, vďaka čomu sa tento efekt ruší. Vďaka tomuto sa UAV dokáže veľmi dobre vznášať na mieste. Ak chceme s UAV letieť dopredu, tak predné motory svoje otáčky znížia a naopak, zadné zvýšia. Takým istým spôsobom vytvára UAV aj náklon. Ak chceme UAV otočiť okolo vertikálnej osi tak pridáme výkon buď naľavo alebo pravotočivých motoroch, podľa toho do akej strany sa chceme otáčať [2].

Motory pre vertikálny vzlet budú umiestnené na predĺžených ramenách trupu, pričom sa uhlopriečky budú pretínať v ťažisku UAV.

Pre horizontálny let bude využité klasické usporiadanie letúna – trup, krídlo a chvostové plochy.



Obrázok 1: Návrh typu UAV [Zdroj: autor]

## IV. STAVBA UAV

### TRUP

Tvar priečného rezu trupu je do istej miery ovplyvnený účelom použitia. Pri voľbe tohto tvaru na daný typ UAV bola použitá elipsa s rovnakým prierezom v prednej aj zadnej časti

trupu. Dĺžka trupu bola navrhnutá tak , aby bola dostatočná na umiestnenie batérie, systému autopilota, prijímača a regulátora

Samotný trup sa skladá z prednej časti, ktorá nesie užitočné zaťaženie a zadnej časti zloženej z dvoch uhlíkových trubiek pokračujúcich až k chvostovým plochám.

Predná časť je vyrobená z polystyrénu a je zložená zo 4 častí vyrezaných cez šablónu pomocou odporového drôtu. Hlavná časť je valcového tvaru s elipsovým prierezom. Práve v tejto časti bude uložená elektronika a batéria bezpilotného prostriedku. Samotný trup je pološkrupinovej polystyrenovo-balzovo-uhlíkovej konštrukcie o celkovej dĺžke 80 cm. Jednotlivé časti sú spájané lepidlom na polystyrén. Polystyrénové časti sú povrchovo upravené balzou o hrúbke 0,6 mm, ktorá je prilepená priamo na polystyrénový trup a spevňuje jednotlivé časti. Balzový povrch trupu je ďalej potiahnutý nažehlovacou fóliou.

### KRÍDLA

Krídlo je zostavené zo štyroch častí. Každá časť má polystyrénové jadro, ktoré je potiahnuté balzou.

Jadro krídla je podobne ako trup vyrezané cez šablónu profilu krídla pri koreni a profilu na konci krídla pomocou odporového drôtu. Toto jadro je spevnené smrekovým nosníkom, pričom nosník je použitý na spevnenie len dvoch vnútorných častí. Vonkajšie celky krídiel nosník nemajú. Hlavné časti, teda vnútorné časti krídiel sú jednoduchého obdĺžnikového tvaru a nemajú voči trupu žiadne vzopätie. Hlavný nosník spája tieto časti a je z jedného kusu bez zmeny uhla. Samotné jadro tvorí okrem polystyrénu aj balzová nábežná a odtoková hrana. Na povrchové spevnenie krídla bola ako plášť krídla použitá balza hrúbky 0,8 mm. Koncové 400 mm dlhé časti krídel sú podobne ako hlavné časti tvorené polystyrenovým jadrom, balzovou nábežnou a odtokovou hranou, potiahnuté balzou, avšak smrekový nosník nie je použitý. Na rozdiel od vnútorných častí, koncové časti majú zužujúci charakter a teda ide o lichobežníkové krídlo. Pre lepšiu stabilitu okolo pozdĺžnej osi bolo medzi hlavnou a koncovou časťou krídla použité vzopätie 20°. Toto vzopätie je použité aj preto, že lietadlo nedisponuje krídelkami [3].

### CHVOSTOVÉ PLOCHY

#### Horizontálny stabilizátor

Horizontálny stabilizátor je jednoduchého obdĺžnikového tvaru so symetrickým profilom. Jeho rozmery boli navrhnuté s ohľadom na veľkosť a hmotnosť UAV. Horizontálny stabilizátor je zhotovený z balzovej doštičky o hrúbke 5mm, pričom nábežná a odtoková hrana sú upravené do požadovaného tvaru, aby bol zabezpečený čo najnižší škodlivý odpor. Samotný horizontálny stabilizátor je povrchovo upravený fóliou tak, ako zvyšok modelu. Kormidlo na horizontálnom stabilizátore, výškovke, má možnosť vychýlky 30 stupňov na obe strany. To zabezpečí UAV dostatočnú ovládateľnosť okolo bočnej osi v konfigurácii UAV s pevnými nosnými plochami. Rozmery horizontálneho stabilizátora sú 340 mm x 140 mm s celkovou plochou 476 cm<sup>2</sup>.

#### Vertikálny stabilizátor

Pre použitie stability okolo kolmej osi letúňa boli navrhnuté dva vertikálne stabilizátory. Tieto stabilizátory sú

umiestnené na koncoch horizontálneho stabilizátora, pričom sú pevne spojené na predĺžených častiach trupu. Vertikálne stabilizátory sú jednoduchého lichobežníkového tvaru. Podobne ako je to pri horizontálnom aj vertikálny stabilizátor je zhotovený z 5 mm balzovej doštičky. Hotová nábežná a odtoková hrana je nalepená na symetrickom stabilizátore, pričom zabezpečuje zníženie škodlivého odporu. Odtoková hrana v celkovej dĺžke 125 mm. slúži u oboch vertikálnych stabilizátoroch ako smerové kormidlo. Smerové kormidlo je súčasne vychýľované u oboch vertikálnych stabilizátoroch naraz, pričom nie je využívaná žiadna diferenciácia. Rovnomerné vychýlenie oboch vertikálnych stabilizátorov zabezpečí tiahlo medzi kormidlami.

Časti UAV sú spojené podobne ako je tomu na obrázku.



Obrázok 2: Finálna verzia UAV bez elektroniky [Zdroj: autor]

## V. POUŽITÁ ELEKTRONIKA PRI STAVBE UAV

### POUŽITÉ MOTORY

Pre pohon vertikálneho vzletu budú slúžiť štyri rovnaké motorčeky, pričom 2 budú napájané polaritou pre otáčanie rotora doprava a dva doľava.

V prípade tohto konkrétneho UAV boli zvolené s ohľadom na rozmery a MTOW modelu motory T-motor Professional Series MN2212 KV780.

### POUŽITÝ ESC

Pre pohon všetkých motorov v UAV bol zvolený regulátor SPEDIX ES30.

Spedix ES30 je vysokovýkonný micro regulátor otáčok s maximálnym trvalým prúdom 30 A. Ide o najľahší regulátor vo svojej kategórii s hmotnosťou len 7,3 g . Regulátor je navrhnutý tak aby lepšie odolával prepätiu , prevádzkovému zaťaženiu , rýchlej zmene prúdov a aby dokonale odvádzal teplo. Tým pádom nemusí byť regulátor otáčok umiestnený priamo pod vrtuľou , ale dokáže sa chlaďiť aj mimo vrtuľového prúdu. Filtračný obvod sa skladá až z dvanástich kondenzátorov, čo znamená že vytvára menšie prúdové vlny, menej ruší signál medzi vysielacom a prijímačom a dodáva väčšiu stabilitu celého systému [4].

### VYSIELAČ

Moderné vysielacie pracujú na frekvencii 2,4 GHz a pred prvým použitím je potrebné spárovať prijímač a vysieláč, čím sa zabráni interferencii a tomu, aby prijímač prijímal signály z iného vysieláča. Vysieláče sa líšia aj počtom kanálov, najčastejšie sa využívajú vysieláče v rozsahu 4 až 12 kanálov. Pre

let s UAV sú nutné najmenej 4 kanály, aby sme dokázali ovládať pohyb okolo všetkých 3 osí a vertikálny pohyb zariadenia. Viac kanálové vysielacie sa používajú napr. pri veľkých modeloch lietadiel, kde je potrebné ovládať aj vztlakové klapky a zasúvanie a vysúvanie podvozku. Každý z týchto úkonov má priradený svoj vlastný kanál. Vysielače sa rozdeľujú aj podľa tzv. módu, najčastejšie sa využíva mód 1 a mód 2, ktoré sa navzájom od seba líšia rozložením ovládacích prvkov na vysielaci (mód 1 má ovládanie ľahu naľavo, mód 2 napravo).

Pre ovládanie VTOL UAV je zvolená šesťkanálová súprava Spectrum DX6.

DX6 je počítačová 6-kanálová vysielacia pracujúca v pásme 2,4 GHz. Je využívaná na lietanie s RC modelmi lietadiel, vrtuľníkov, prípadne iných modelov. Vysielač je vybavený hlasovými signálmi – telemetria – letové prístroje – rýchlosť, výška, stav batérií a podobne. V našom prípade budú pri vertikálnom vzlete využité štyri kanály – pohyb okolo všetkých osí UAV a vertikálny pohyb. Na zmenu konfigurácie UAV z VTOL na letún bude využitý jeden voľný kanál – spínač prepnutia konfigurácie. Pri konfigurácii – letún (značná časť letu UAV) budú využité len tri kanály. Prvý kanál na ovládanie otáčok motora, druhý kanál pre smerové kormidlo a posledný tretí kanál pre výškové kormidlo.

### **PRIJÍMAČ**

Podobne ako vysielateľ aj prijímač je 6-kanálový značky SPECTRUM. Svojou hmotnosťou a plným dosahom vytvára mikroprijímač Spektrum DSMX - 6CH AR610 ideálnu súčasť na ovládanie UAV. Jeho hmotnosť je len 9 g, pričom dokonalý príjem signálu vďaka 190 mm dlhej 2,4 GHz anténe zostáva zachovaný. Prijímač bude napájaný priamo z riadiacej jednotky Pixhawk. Napájacie napätie je 3,5 – 9,6 V.

## **VI. POUŽITÁ ELEKTRONIKA PRI STAVBE UAV**

### **PIXHAWK**

Jedná sa o „open-source“ riadiacu dosku určenú hlavne pre amatérske autonómne lietadla, UAV, lode a ponorky. Relatívne nízka cena, dostupnosť a spoľahlivosť umožňuje využívať túto riadiacu dosku v malých neriadených lietadlách / UAV. Na zabezpečenie letu Pixhawk využíva senzory na určenie a následne vyhodnotenie stavu v akom sa lietadlo nachádza tieto údaje následne využíva pre stabilizáciu, prípadne autonómny let. Pixhawk na tento účel využíva senzory ako gyroskop, akcelerometer, magnetomer (kompas) a barometer, ktoré sú už priamo implementované na doske. Tieto senzory sú neodmysliteľnou súčasťou pre správny priebeh letu. Avšak pre maximálne využitie je potrebné k Pixhawk pripojiť GPS alebo iný pozíčný systém a tým umožniť využívanie všetkých automatických alebo asistenčných módov. Ďalej je možné k Pixhawk pripojiť rôzne senzory od snímaču vzduchu rýchlosti (využite pre presné meranie rýchlosti, hlavne u UAV s pevnými nosnými plochami lietadiel a VTOL) až po LiDAR (vyhýbanie sa prekážkam) [5] [6].

### **ZAPOJENIE VTOL DO PIXHAWK**

#### **Zapojenie motorov / serv**

Pri navrhovaní UAV bol zvolený typ quad X VTOL, v tomto prípade sa signál z ESC (motorov) pripája na piny AUX OUT 5 až 8 (1 až 4 budú použité pre servá) v tomto poradí:

Output 5: Právý predný motor, otáča sa proti smeru hodinových ručičiek (CCW)

Output 6: Ľavý zadný motor, otáča sa proti smeru hodinových ručičiek (CCW)

Output 7: Ľavý predný motor, otáča sa po smere hodinových ručičiek (CW)

Output 8: Právý zadný motor, otáča sa po smere hodinových ručičiek (CW)

Servá sa zapoja podľa toho aký mód vysielacky sa bude používať do AUX Out 1 až 4 (Pre mód 2 je to: Aux 1 smerovka, Aux 2 výškovka, Aux 3 plyn, Aux 4 krídlečka) [5].

### **KONFIGURÁCIA VTOL**

#### **Inštalácia firmwaru**

Pri konfigurovaní VTOL je potrebné v prvom rade nainštalovať firmware pre UAV s pevnými nosnými plochami. Po pripojení Pixhawk k PC sa prejde na záložku Initial Setup, po odkliknutí na možnosť Install Firmware sa vyberie možnosť ArduPlane V4.0.5 (verzia sa môže líšiť). Po kliknutí Mission planner automaticky stiahne príslušný firmware pre riadiacu dosku a nainštaluje ho. Po nainštalovaní Mission planner vyzýva, aby sa počkalo na hudobné tóny a až potom sa odklikne OK (v prípade že nie je pripojený „buzzer“ nie je počuť nič, zvyčajne stačí počkať cca 1 min a kliknúť na OK) [7].

#### **Zapnutie podpory VTOL**

Na začiatku v Full parameter list sa vyhľadá pomocou vyhľadávania vpravo parameter Q\_ENABLE – Tento parameter je nastavený na hodnotu 0 pri ktorej je vypnutá podpora VTOL, zmenou tohto príkazu na hodnotu 1 sa zapne podpora VTOL. Obnovíme parameter list kliknutím na tlačidlo refresh params, od tohto momentu sú viditeľné všetky parametre pre VTOL sú rozpoznateľné tým že začínajú znakom Q [7].

#### **Výber typu konštrukcie**

Na výber správneho typu konštrukcie ktorá bude použitá slúžia parametre Q\_FRAME\_CLASS a Q\_FRAME\_TYPE.

Q\_FRAME\_CLASS môže byť:

- 1 pre quad
- 2 pre hexa
- 3 pre octa
- 4 pre octaquad
- 5 pre Y6
- 7 pre Tri
- 10 pre Tailsitter

V tomto prípade je potrebné zmeniť hodnotu na 1 (quad).

Parameter Q\_FRAME\_TYPE určuje typ usporiadania motorov.

- 0 pre plus frame
- 1 pre X frame
- 2 pre V frame
- 3 pre H frame
- 11 pre FireFly6Y6 (for Y6 only)

Pre tento typ UAV opäť zmena na hodnotu 1 (X frame).

### Ďalšie kľúčové parametre

Q\_M\_SPIN-ARM parameter je dôležitý pre dosiahnutie správnej rýchlosti motorov po „odarmovaní“ VTOL, príliš vysoká hodnota spôsobí to, že ihneď po zapnutí motorov sa VTOL vznesie do vzduchu (hodnota 0.1 by mala byť dostačujúca) [7].

Q\_A\_RAT\_RLL-P a Q\_A\_RAT\_PIT-P tieto parametre sú najkritickejšie parametre pri ladení VTOL, hodnota je nastavená na 0,25, avšak je možné že bude potreba túto hodnotu zvýšiť (prílišné zvýšenie hodnoty bude mať za následok veľmi ostré reakcie UAV a UAV sa bude celkovo chvieť, pri príliš nízkych bude UAV reagovať veľmi spomalene a lenivo) [7].

### RTL\_AUTOLAND

Parameter ktorý určuje ako sa má VTOL správať pri prepnutí do módu RTL

Hodnota 0 – vypnuté RTL

Hodnota 1 – Zapnuté, UAV pôjde na miesto vzletu a tam pristane

Hodnota 2 – Zapnuté, UAV začne okamžite pristávať

Nakoľko v tomto UAV nebude použitý GPS snímač použije sa hodnota 2 aby VTOL prešlo okamžite na pristátie. (toto nastavenie je dôležité pre prípadný výpadok signálu (failsafe) [16].

### FS\_LONG\_ACTN

Tento parameter určuje ako sa má VTOL zachovať v prípade Failsafe.

Hodnota 0 – Bude pokračovať v lete

Hodnota 1 – prepne sa do módu RTL

Hodnota 2 – začne kĺzať

Hodnota 3 – otvorí padák

Ideálne pre tento typ UAV bude hodnota 1 nakoľko ide o najbezpečnejšiu z vyššie uvedených možností.

Q\_OPTIONS je „bitmaska“ ktorá určuje správanie sa funkcie VTOL.

Bitmask 0 – VTOL vzlietne ako UAV s rotujúcimi nosnými plochami - multikoptéra

Bitmask 1 – VTOL vzlietne ako UAV s pevnými nosnými plochami - letún

Bitmask 2 – VTOL bude pristávať UAV s pevnými nosnými plochami - letún

Ostatné „bitmasky“ nie sú pre užívateľa dôležité, nakoľko nemajú význam pre daný typ UAV.

„Bitmaska“ sa ponechá v tomto prípade na hodnotu 0.

## VII. PROGRAM XFLR5

Nasledovná časť je zameraná dizajnu a niektorým charakteristikám nosných plôch UAV v konfigurácii letún. Program XFLR5 je modelovací program, pomocou ktorého je možné uskutočniť určité merania a analýzy súvisiace s problematikou rozličných krídel a ich profilov. V prípade krídla UAV bol navrhnutý profil, ktorý svojimi vlastnosťami v najväčšej miere odpovedal požiadavkám pre letové charakteristiky letúňa. Po porovnávaní a zvažovaní rôznych možností a druhov zo širokej škály profilov, odpovedal týmto požiadavkám najlepšie tvar profilu s typovým označením NACA 4412.

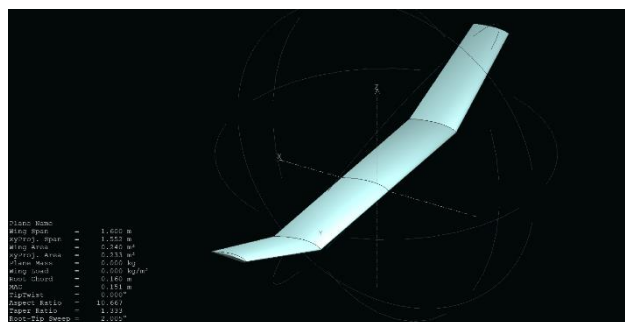
### MODELÁCIA KRÍDLA V PROGRAME XFLR5

Program XFLR5 taktiež poskytuje funkciu modelácie krídla pre UAV v konfigurácii letún. Pri zadaní základných parametrov krídla, program vymodeluje krídlo, tak ako je zobrazené na obrázku. Rozpätie krídla dosahuje hodnotu 1,6 metra a pri dĺžke tetivy 0,16 m na koncoch krídla 0,12 m program vyrátal plochu krídel 0,24 m<sup>2</sup>. Pri odhadovanej hmotnosti modelu bude plošné zaťaženie krídla 5,4 kg/m<sup>2</sup>. Tetiva na koreni krídla má dĺžku 0,16m, na koncoch krídel 0,120 m. Hodnota Strednej aerodynamickej tetivy (M.A.C) je 0,151 metra.

Z dôvodu jednoduchšej stavby, skrútenie krídla nie je použité. Geometrické a aerodynamické skrútenie krídla by zlepšilo hlavne pádové vlastnosti. Pádové vlastnosti pre typ obdĺžnikového v spojení s lichobežníkovým krídlom sú vyhovujúce. Odtrhávajúce prúdnice na povrchu krídla nastáva od koreňa a šíri sa ďalej ku krídelkám. Tým pádom existuje pri páde stále možnosť kontroly lietadla.

Ďalším významným prvkom v tabuľke je „aspect ratio“ – v preklade štíhlosť krídla. Je to pomer rozpätia krídel ku strednej aerodynamickej tetive krídla. Program vypočítal hodnotu tohto pomeru ako 10,667:1. Je možné tvrdiť, že čím vyšší tento pomer štíhlosti k strednej aerodynamickej tetive lietadlo má, tak tým má aj lepšie aerodynamické vlastnosti – lepšiu kĺzavosť [8].

„Taper ratio“ predstavuje pomer lomenia krídla. UAV má lomené krídlo presne od polovice a jeho hodnota je 1,333.



Obrázok 3 - Modelácia krídla v XFLR5 [Zdroj: autor]



## KRÍDLO A POLOHA Cp

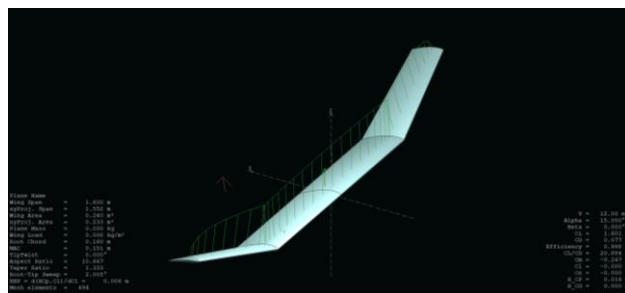
V tejto v programe XFLR5 pozorovaný priebeh zmeny pôsobiska vztľaku so zmenou uhla nábehu naprogramovanom krídle UAV. Pôsobisko vztľaku je priesečnica výslednej aerodynamickej sily s tetivou krídla. V tomto bode je vplyv momentu aerodynamických síl na profile nulový. Pri nesymetrických profiloch býva pôsobisko vztľaku približne v jednej tretine strednej aerodynamickej tetivy. Pri postupnom zvyšovaní uhla nábehu sa pri správne navrhnutom krídle musí pôsobisko vztľaku posúvať smerom dopredu, čiže k nábežnej hrane krídla. Pri symetrických profiloch je situácia odlišná. Pôsobisko vztľaku sa v prípade týchto profilov nachádza v jednej štvrtine dĺžky tetivy a v tomto mieste aj počas letu zotrúva. Z daného vyplýva, že je pri zmenách uhlov nábehu nemenné.

Pre profil sa stanovili štyri základné hodnoty uhla nábehu, a to -5, 0, 4 a 15 stupňov. Tieto hodnoty sú takmer identické aj pre samotné krídlo. V modelovacom programe XFLR5 sa analyzoval pohyb pôsobiska vztľaku pri určených štyroch hodnotách. Pokiaľ sa zadefinovali náležité hodnoty a krídlo správne v programe navrhlo, malo by vychádzať, že pôsobisko vztľaku sa nachádza najviac vzadu práve pri uhle nábehu -5 stupňov a najviac vpredu, skoro pri nábežnej hrane, pri hodnote uhla nábehu 15 stupňov. Aby sa mohli spustiť simuláciu pohybu pôsobiska vztľaku po krídle, je potrebné zadefinovať v programe ďalšie hodnoty. Jednou z nich je rýchlosť letu. Rýchlosť letu pre UAV s pevnými nosnými plochami sa určila na 12 m/s v prepočte 42 km/h. Uhol náklonu a vybočenie sa zadefinovalo nulovými hodnotami [8].

Podľa simulácie sa pôsobisko vztľaku pohybuje smerom k nábežnej hrane s narastajúcim uhlom nábehu, tak ako sa očakáva. Pre každý zo štyroch zvolených uhlov nábehu, od nula do pätnásť stupňov, je vyhotovený obrázok, v ktorom sa nachádza aj tabuľka hodnôt. Sú tu hodnoty koeficientov vztľaku CL, odporu CD, závislosti vztľaku a odporu CL/CD, koeficient momentu Cm a koeficient X-Cp predstavujúci vzdialenosť pôsobiska vztľaku od nábežnej hrany. Hodnoty koeficientov a závislosti CL, CD, CL/CD a Cm sa líšia od hodnôt, ktoré boli vypočítané pre profil krídla. Tieto hodnoty sú rozličné z toho dôvodu, že prúdenie na krídle a na profile je rozdielne. Hodnoty závislosti CL/CD sú podstatne nižšie ako tomu bolo pri samotnom profile, no napriek tomu sú vysoké. V prípade použitia trupu UAV v simulácii, by sa hodnoty znížili ešte viac [8].

### ROZLOŽENIE VZTLAKU NA KRÍDLE

Modelovací program XFLR5 poskytuje taktiež funkciu vykreslenia a následnej simulácie rozloženia vztľaku po krídle pri zmene uhlov nábehu. V tomto obdĺžnikovo-lichobežníkového krídla sa rozloženie vztľaku mení od konca krídla ku koreňu s rastúcim trendom. Tento spôsob rozloženia vztľaku je pre návrh prijateľnou voľbou. V situácii, kedy sa lietadlo nachádza v páde, nastáva na krídle odtrhnutie prúdenia vzduchu najprv pri koreni krídla a až postupne sa dostáva do oblasti krídeliek. Tento jav je viac ako žiaduci. Pre porovnanie, pokiaľ by bolo zvolené krídlo eliptického tvaru, rozloženie vztľaku by bolo v tvare obdĺžnika, čo znamená, že od konca krídla až ku koreňu by bolo rovnaké. V prípade pádu sa odtrháva prúd vzduchu rovnomerne po celej odtokovej hrane, čo predstavuje nežiaduci stav [8].



Obrázok 4 - Rozloženie vztľaku v XFLR5 [Zdroj: autor]

V teoretickej rovine aerodynamiky je možné hovoriť o dvojrozmernom obtekaní krídla. V teoretickej rovine preto, lebo v reálnej praxi sa takýmto obtekaním môžeme stretnúť len pri profiloch, alebo krídlach veľkej štihlosti, ako napríklad pri vetroňoch. Vplyvom konečnosti krídla je však jeho skutočné obtekanie priestorové.

Pokiaľ je uhol nastavenia krídla letúna kladný, tak potom pri jeho obtekaní prúdom vzduchu vzniká nad jeho hornou časťou oblasť nižšieho tlaku, alebo podtlaku a na spodnej naopak vzniká oblasť vyššieho tlaku, tiež nazývaná pretlak. Práve toto je dôvodom, prečo vzduch prúdi nielen v smere nabiehajúceho prúdu, ale aj pozdĺž celého rozpätia krídla.

Z dôvodu existencie rozdielnych tlakov nad a pod krídlom, dochádza k pretekaniu vzduchu zo spodnej, pretlakovej časti, do hornej časti kde je tlak nižší, čo je spôsobené tvarom profilu. Poskladaním vektorov rýchlosti pozdĺžneho prúdenia na spodnej časti krídla a rýchlosti prúdenia nabiehajúceho prúdu vzduchu vytvoríme obraz skutočného obtekania krídla, ktoré je charakteristické vznikom vírivého prúdenia vzduchu na koncoch krídel. Tieto okrajové víry postupne vplyvom viskozity prostredia zanikajú.

Efekt vírov bude na UAV znížený pomocou zúženého koncových častí krídel, ktoré síce nie sú také účinné ako winglety, ale svoj účel plnia. V prípade letu UA v konfigurácii letún by pri cestovných rýchlostiach produkovali prípadné winglety väčšiu zložku škodlivého odporu ako je zložka indukovaného odporu bez použitia metód na zníženie indukovaného odporu.

### PRÁCA V PROGRAME AIRCRAFT SUPER CALCULATOR

Pre vypočítanie nových hodnôt a pre overenie už predtým získaných, sa použil program Aircraft supercalculator. Pre nasimulovanie UAV týmto programom je nutné doň na začiatku zadať parametre typu: dĺžka tetivy pri koreni na krídle a na horizontálnom stabilizátore, dĺžku tetivy na konci krídla a horizontálneho stabilizátora, polovicu rozpätia krídla a horizontálneho stabilizátora, vzdialenosť od nábežnej hrany krídla ku nábežnej hrane stabilizátora. Všetky údaje sa vkladajú v centimetroch. Ako posledný parameter sa zvolila aká zásobu statickej stability je požadovaná. Hodnoty sú odporúčané od 7-10 percent. Pre tento typ UAV sa zvolila hodnota 8 percent.

Po výpočtoch je potrebné overiť správnosť jednotlivých výsledkov. Z modelovacieho programu XFLR5 sú už predtým získané hodnoty plochy krídla, štihlosti krídla a zalomenia krídla. Individuálne hodnoty z oboch programov sa zhodujú, čo potvrdzuje funkčnosť programov.

Jednou z najdôležitejších hodnôt, ktorá je potrebná pre návrh a rozloženie elektroniky v UAV, je aj poloha ťažiska CG. Program ho vypočítal ako najideálnejšie v polohe 18 percent SAT, čiže 27,1 mm od nábežnej hrany SAT. Pre konvekčné lietadlo by sa poloha mala nachádzať niekde medzi 25 – 35 percent. Ďalšou dôležitou veličinou je neutrálny bod. Program určil jeho polohu ako 26 percent strednej aerodynamickej tetivy. Záloha stability teda predstavuje 1,13 cm. Ostatné programom vypočítané hodnoty je možné skontrolovať na priloženom obrázku [8].

### VIII. ZÁVER

Využívanie lietadiel sa stáva v dnešnej dobe čoraz viac a viac špecializované len na prepravu osôb a nákladu a to primárne na dlhé vzdialenosti. Vo väčšine leteckých prác hlavne tam kde sa nevyžaduje prevoz ťažkého materiálu sú využívané bezpilotné letecké prostriedky. To súvisí hlavne so znižovaním nákladov, znižovaním emisií, jednoduchosti obsluhy a v konečnom dôsledku širšou škálou využitia, či už ide o poľnohospodárstvo, kinematografiu, armádne využitie alebo dokonca pátracie a záchranné akcie. Pri tomto všetkom museli byť v minulosti použité vrtuľníky alebo lietadlá.

Cieľom diplomovej práce bolo vytvorenie podrobného plánu a analýzy pre stavbu bezpilotného leteckého prostriedku. Bezpilotné letecké prostriedky existujú rôzneho druhu. Ide o celú radu typov a kategórií rozdelených aj v prvých kapitolách diplomovej práce. Pre stavbu bolo vybraté v celku ojedinelé UAV ktoré svojou konštrukciou a nakonfigurovaním má väčšinu kladných vlastností. Išlo o návrh bezpilotného leteckého prostriedku s možnosťou vertikálneho vzletu a pristátia. V prvých kapitolách je popísaný samotný postup stavby, konkrétny výber materiálu, jeho požitie a spracovanie do jednotlivých častí UAV. Nasleduje výber správnej elektroniky, vhodné elektromotory, servá, batéria, RC sústava a v neposlednom rade riadiaca jednotka v podobe Pixhawk. Pre Pixhawk je venovaná celá nasledovná kapitola, pri ktorej sa čitateľ oboznámi s presným nastavením nevyhnutným pre vertikálny vzlet a pristátie UAV. Podobne ako vzletu a pristátia sa kapitola zaoberá aj veľmi dôležitým nastaveniu a tým je prechod konfigurácie z UAV s rotujúcimi nosnými plochami na UAV s pevnými nosnými plochami. Vďaka tejto práci dokáže čitateľ v amatérskych podmienkach zostaviť letún z dostupných materiálov, zabudovať a nastaviť elektroniku vhodnú pre daný typ prevádzky a nakonfigurovať UAV pre vertikálny vzlet a pristátie. Výpočty slúžia na určenie prevádzkových limitov, konkrétne o škálu rýchlostí a násobkov v ktorých možno UAV bezpečne používať. Tento typ bezpilotného leteckého zariadenia má širokú škálu využitia. Rozmery trupu a krídiel sú prispôbené následnému zabudovaniu kamier alebo iných prostriedkov, ktoré možno neskôr využívať pri leteckých prácach.

### POĎAKOVANIE

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu **KEGA 046ŽU-4/2019** s názvom „Inovácia vzdelávania v oblasti prevádzky lietadiel spôsobilých lietať bez pilota“.

### REFERENCIE

- [1] PECHO, P., ŠKVAREKOVÁ, I., AŽALTOVIČ, V., BUGAJ, M. UAV usage in the process of creating 3D maps by RGB spectrum. In Transportation Research Procedia. Volume 43, 2019 [2020-02-20]. Pages 328-333. ISSN 2352-1465.
- [2] DroneBot Workshop. How does a Quadcopter Work? [online]. Dostupné na internete: [https://dronebotworkshop.com/how-does-a-quadcopterwork/?fbclid=IwAR06\\_sqdKbx6Gt9ugBIC061XxU7EwWddnP\\_ugl1Q03s\\_AoArJuIXTiq2UFM](https://dronebotworkshop.com/how-does-a-quadcopterwork/?fbclid=IwAR06_sqdKbx6Gt9ugBIC061XxU7EwWddnP_ugl1Q03s_AoArJuIXTiq2UFM) (citované 2020-03-01)
- [3] PECHO, P., AŽALTOVIČ, V., KANDERA, B., BUGAJ, M. Introduction study of design and layout of UAVs 3D printed wings in relation to optimal lightweight and load distribution. In Transportation Research Procedia. Volume 40, 2019 [2020-02-20]. Pages 861-868. ISSN 2352-1465.
- [4] Quadcopters drone racing specialists. SPEDIX ES30 HV LITE 30A 3-6S BLHELI\_S ESC [online]. Dostupné na internete: <https://www.quadcopters.co.uk/spedixes30-hv-lite-30a-2-4s-blhelis-esc2778?fbclid=IwAR0XIcS2bibDO69J5w6LKIBRgYnClfRvA4N490ZiqxMR7ee76plX931xnT8> (citované 2020-03-29)
- [5] Pixhawk. Pixhawk [online]. Dostupné na internete: [https://pixhawk.org/?fbclid=IwAR0L\\_wNxXDVjQPv8pGNNIrT0593cZx4vfxXwVkgQqYmB5MJIDcJE8G1\\_FdM](https://pixhawk.org/?fbclid=IwAR0L_wNxXDVjQPv8pGNNIrT0593cZx4vfxXwVkgQqYmB5MJIDcJE8G1_FdM) (citované 2020-03-01)
- [6] Kang Yang, Guang You Yang, S Isi Huang Fu. Research of Control System for Plant Protection UAV Based on Pixhawk. In Procedia Computer Science. Volume 166, 2020 [2020-04-15]. Pages 371-375. ISSN 1877-0509.
- [7] Adupilot. Mission Planner Home [online]. Dostupné na internete: <https://ardupilot.org/planner/?fbclid=IwAR1yQxzisiYhrrJHh9fU29pCwnY15V7qfFJ1KRJcPZqhGjpRabM2PiOIFw> (citované 2020-03-01)
- [8] Guidelines for QFLR5. XFLR5 Analysis of foils and wings operating at low Reynolds numbers [online]. Dostupné na internete: [https://engineering.purdue.edu/~aerodyn/AAE333/FALL10/HOMEWORKS/HW13/XFLR5\\_v6.01\\_Beta\\_Win32%282%29/Release/Guidelines.pdf](https://engineering.purdue.edu/~aerodyn/AAE333/FALL10/HOMEWORKS/HW13/XFLR5_v6.01_Beta_Win32%282%29/Release/Guidelines.pdf) (citované 2020-03-01)
- [9] ŠKULTÉTY, F., BADÁNIK, B., BARTOŠ, M. & KANDERA, B. 2018. Design of Controllable Unmanned Rescue Parachute Wing. Transportation Research Procedia 35, pages 220-229
- [10] KURDEL, P., NOVÁK SEDLÁČKOVÁ, A., LUBUN, J. 2019. UAV flight safety close to the mountain massif. Transportation Research Procedia, Volume 43, 2019, Pages 319-327, ISSN 2352-1465
- [11] BUGAJ, M., NOVÁK, A. 2010. Všeobecné znalosti o lietadle : drak a systémy, elektrický systém. - 1. vyd. - Žilina : Žilinská univerzita, 2004. - 247 s. - ISBN 80-8070-210-1.

Tomáš Sisák – narodený dňa 27.06.1997 v Kežmarku absolvoval v roku 2015 Osemročné gymnázium na Ulici Dominika Tatarku v Poprade, následne od roku 2015 študoval na Žilinskej univerzite v Žiline odbor letecká doprava. Od roku 2018 pokračoval v inžinierskom štúdiu na Žilinskej univerzite v Žiline v odbore technológia údržby lietadiel. Absolvoval letecký výcvik na získanie kvalifikácie SPL a PPL.