FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Ústav letadlové techniky

Návrh kolmo startujícího letounu

Design of vertical take-off and landing airplane

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Michal MRÁZEK

Studijní program:	B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce:	Ing. Hospodář Pavel

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mrázek** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **484714**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh kolmo startujícího letounu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of vertical take-off and landing airplane

Pokyny pro vypracování:

Cílem této práce je vytvořit matematický model kolmo startujícího letounu a posoudit jeho technický a ekonomický přínos k dané problematice.
Hlavní body práce jsou:
1) Provést rešerši současných VTOL UAV a vybrat vhodnou koncepci. Definovat mise pro následný návrh.
2) Navrhnout kolmo startující letoun
a. Výběr vhodných vrtulí pro vertikální a horizntální let
b. Vytvoření geometrie letounu a výpočet aerodynamický charakteristik
c. Sestavení matematického modelu dynamiky letu
d. Hmotová a energetická analýza
3) Návrh řídicích zákonů umožňující provedení předepsané mise, stanovení výkonů a potřebné kapacity baterií.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Hospodář, VZLU Praha

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Pavel Hospodář	Ing. Robert Theiner, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání _____ Podpis studenta _____

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze **Michal Mrázek**

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce panu Ing. Pavlu Hospodářovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu nejen během psaní bakalářské práce, ale i během celého studia

Anotační list

Autor:	Michal MRÁZEK	
Název BP/DP:	Návrh kolmo startujícího letounu	
Rok vyhotovení:	2021	
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství	
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový	
Ústav:	Ústav letadlové techniky	
Vedoucí BP/DP:	Ing. Pavel Hospodář	
Konzultant:		
Bibliografické údaje:	počet stran	27
	počet obrázků	5
	počet grafů	3
	počet tabulek	7
	počet příloh	2
Klíčová slova:	VTOL, rozvážkový dron, Simulink, OpenVSP	

Anotace: Práce se zaměřuje na problematiku návrhu a řízení rozvážkového VTOL letounu. Kromě toho taky bere v potaz ekonomickou stránku provozu tohoto stroje.

Abstrakt: Tato práce se zabývá tvorbou matematického modelu autonomního letounu pro doručování zásilek. Po rešerši používaných koncepcí je proveden aerodynamický návrh, návrh vrtulí a odhad hmotnosti. Součástí práce je simulace matematického modelu a posouzení ekonomického přínosu letounu

Obsah

1. Úvod ... 8
1.1. Používané doručovací drony ... 8
1.2. Stanovení mise ... 12
1.3. Dynamika letounu a multikoptéry ... 12
1.3.1. Dynamika multikoptéry ... 12
1.3.2. Dynamika letounu ... 13
2. Návrh letounu ... 15
2.1. Návrh geometrie letounu ... 16
2.2. Odhad hmotnosti ... 18
2.2.1. Odhad hmotnosti draku letounu ... 18
2.2.2. Odhad hmotnosti motorů ... 19
2.2.3. Odhad hmotnosti baterií ... 20
2.2.4. Celkový odhad hmotnosti ... 20
2.3. Výběr pohonu ... 21
2.3.1. Výběr vrtule ... 21
2.3.2. Výběr baterií ... 22
2.4. Dynamika letu ... 23
3. Simulace letu ... 26
3.1. Simulink ... 26
3.1.1. Popis systému ... 26
3.1.2. Řízení kvadrokoptéry ... 27
3.1.3. Řízení letounu ... 28
3.1.4. Simulace letu ... 29
3.2. Posouzení ekonomického dopadu ... 30
3.2.1. Výhody dopravních dronů ... 30
3.2.2. Nevýhody dopravních dronů ... 31
3.2.3. Porovnání letounu a dodávky ... 31
3.2.4. Vhodné využití letounu ... 32
4. Závěr ... 34

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

α	úhel náběhu	$[rad]$
δ	úhel vychýlení výškovky	$[rad]$
Φ	úhel náklonu	$[rad]$
θ	úhel podélného sklonu	$[rad]$
ρ	hustota vzduchu	$[kgm^{-3}]$
$\boldsymbol{a}$	zrychlení	$[ms^{-2}]$
b	rozpětí křídel	$[m]$
c	tětiva profilu	$[m]$
D	průměr vrtule	$[m]$
C_P	koeficient výkonu	$[1]$
C_T	koeficient tahu	$[1]$
C_L	koeficient vztlaku	$[1]$
C_{L-VOP}	koeficient vztlaku výškovky	$[1]$
C_L'	návrhový koeficient vztlaku	$[1]$
C_D	koeficient odporu	$[1]$
C_M	koeficient klopivého momentu	$[1]$
$\boldsymbol{F}$	vektor síly	$[N]$
$\boldsymbol{F_T}$	vektor tahových sil	$[N]$
$\boldsymbol{F_{AERO}}$	vektor aerodynamických sil	$[N]$
F_{VZ}	vztlaková síla	$[N]$
F_O	odporová síla	$[N]$
g	gravitační zrychlení	$[ms^{-2}]$
$\boldsymbol{G}$	vektor tíhové síly	$[N]$
I	moment setrvačnosti	$[kgm^2]$
J	rychlostní poměr	$[1]$
L	délka letounu	$[m]$
l	rameno síly	$[m]$
m	hmotnost letounu	$[kg]$
m_{KV}	hmotnost kvadrokoptéry	$[kg]$

m'_L	odhadovaná hmotnost letounu	$[kg]$
m'_M	odhadovaná hmotnost motorů	$[kg]$
m'_B	odhadovaná hmotnost baterií	$[kg]$
n	otáčky motoru	$[s^{-1}]$
$\boldsymbol{p}$	hybnost	$[kgms^{-1}]$
P	výkon vrtule	$[W]$
PID	Proporcionální Integrační Derivační	
S_K	referenční plocha křídla	$[m^2]$
S_{VOP}	referenční plocha výškovky	$[m^2]$
T	tah vrtule	$[N]$
v	celková rychlost	$[ms^{-1}]$
v_x	rychlost ve směru osy x	$[ms^{-1}]$
v_y	rychlost ve směru osy y	$[ms^{-1}]$
VLM	Vortex Lattice Method	
VOP	Vodorovná Ocasní Plocha	

1. Úvod

Před několika lety se začala testovat myšlenka doručování zásilek pomocí autonomních letadel a od té doby v tomto oboru došlo k velkému pokroku.

Tato práce si klade za cíl vytvořit matematický model doručovacího letounu s kolmým vzletem a přistáním, který bude schopen plnit zadanou misi.

Práce je rozdělená na 3 části. V první části je provedena rešerše současných zásilkových dronů a je stanovena mise, pro kterou se bude navrhovat letoun. Druhá část obsahuje výpočet a odhad parametrů a sestavení matematického modelu. Třetí část se zabývá simulací a posouzením ekonomického přínosu.

1.1. Používané doručovací drony

Přepravní společnost DHL začala experimentovat s doručováním prostřednictvím dronu už v roce 2013 a od té doby vyzkoušela několik koncepcí přepravních dronů. Jako první použila manuálně ovládanou kvadrokoptéru Parcelcopter 1.0, která měla dolet 1 km a unesla náklad do hmotnosti 1,2 kg. O rok později ji vystřídala kvadrokoptéra Parcelcopter 2.0, která už disponovala autonomním řízením. Nosnost zůstala stejná, ale dolet se zlepšil na 12 km [1].

V roce 2016 ji nahradil letoun Parcelcopter 3.0. Jedná se dvoumotorový letoun koncepce tilt-wing (naklápěcí křídlo). Letouny s naklápěcím křídlem jsou schopné kolmého vzletu a přistání. Takovýto stroj má motory pevně umístěné na křídlech, pro kolmý vzlet se natočí křídla do svislé polohy a motory zvednou letoun. Pro přechod do vodorovného letu se křídla pomalu otočí do vodorovné polohy a stroj pokračuje v dopředném letu, jako letadlo. Hlavní nevýhodou této koncepce je konstrukční složitost otáčení křídel. Ani u velkých letadel není tato koncepce příliš obvyklá. Tento dron unese balíček o hmotnosti 2 kg a má dolet 8,3 km. Testoval se pro dodávky v horském prostředí [1].

Obrázek 1 DHL Parcelcoper 3.0 [9]

Další uspořádání, kterou DHL používá, je tilt-rotor (naklápěcí rotor). Letoun takovéto koncepce má pevně spojený trup a křídla. Pro kolmý vzlet a přistání se naklopí pouze motory. Hlavní výhodou oproti letounům tilt-wing je, že jsou konstrukčně jednodušší. Na druhou stranu, pokud je zadní motor umístěný za předním, kvůli turbulentnímu proudění, které vytváří přední rotor a křídlo, nedosahuje takové účinnosti při dopředném letu. Parcelcopter 4.0 unese 4 kg, na vzdálenost 65 km a je schopný dosáhnout rychlosti až 130 km/h. Vyrábí ho firma Wingcopter a DHL ho provozuje od roku 2018 [1].

Obrázek 2 DHL Parcelcopter 4.0 [1]

DHL v Číně testuje doručování zásilek ve velkých městech pomocí multikoptéry Falcon od vyvinuté firmou EHang. Tento dron nese 8 motorů na 4 ramenech a je plně autonomní. Motory jsou uspořádány po dvojicích pod sebou. Dron dokáže unést náklad o hmotnosti 5 kg. Jeho hlavní výhodou, je že ho nebrzdí doprava velmi hustě osídlených čínských měst. Doba dodání zásilky se tak zkrátila ze 40 minut na 8 minut a společnost ušetří 80 % nákladů. Tento projekt nahrazuje využití pošty nebo jiné kurýrní firmy, protože odesílatel vloží svůj balíček to speciální budky, která slouží jako základna pro dron, a ten ho doručí na místo určení [2].

Americká společnost Bell Textron, zvolila uspořádání tail-sitter. Letouny typu tail-sitter vzlétají a přistávají pouze svisle; před vzletem stoj ,,sedí'' na ocasu a špička letounu míří kolmo vzhůru. Po vzletu se letadlo přetočí do vodorovného letu. Bell APT (Autonomous Pod Transport) je veliký dron schopný dosáhnout rychlosti až 167 km/h s doletem až 29 km. Do svých útrob dokáže naložit náklad o hmotnosti až 25 kg [3].

V australském městě Canberra je možné si objednat kávu, zákusek nebo něco z lékárny a zásilku doručí dron, který pro Google zkonstruovala firma Wing. Disponuje 2 motory pro dopředný let, a 12 motory pro vzlet a vis. K předání zásilky dochází tak, že dron zastaví ve vzduchu u zákazníkova domu a zásilku spustí po laně, klient si odeberete balíček, dron následně navine lano zpět a odletí převzít další zásilku [4].

Spolupráce společností UPS Flight Forward a výrobce dronů Matternet si klade za cíl zefektivnit zásobování a předávání vzorků mezi nemocnicemi. Toho se snaží dosáhnout pomocí kvadrokoptéry M2, která je vybavena speciálním boxem pro přenášení zásilek, který lze lehce sundat i nandat. Přesně tyto stroje spojují několik nemocnic v Severní Karolíně a přenášejí mezi nimi vzorky, léky, ale i ochranné pomůcky. Společnost cílí na přepravu velmi specifických drahých léků s krátkou dobou trvanlivosti. Zároveň lze dron použít k rychlé dopravě vzorků do laboratoří, aby bylo možné zajistit výsledky v co nejkratším čase [5].

Využít drony k dopravě věcí na lodě zakotvené při pobřeží se snaží firma Airbus. Náklad o hmotnosti až 4 kg dokáže tato oktakoptéra donést na loď vzdálenou až 3 km. Přepravou náhradních dílů a dalších věcí na lodě zakotvené mimo přístav lze ušetřit mnoho času a energie. Airbus odhaduje, že zavedení takového systému v přístavu by mohlo ušetřit až 90 % nákladů a 6x urychlit dobu dodání [6].

Firma	Křídla	X-koptéra	Hmotnost [kg]	Dolet [km]
Mall.cz	Ne	4	2	1,7
DHL Ehang Falcon	Ne	8	5	8
DHL Parcelcopter 4.0	Ano	4	4	65
DHL Parcelcopter 3.0	Ano	-	2	8,3
DHL Parcelcopter 2.0	Ne	4	1,2	12
Google	Ano	12	1,5	20
Amazon Prime Air	Ne	8	2,25	16
Flytrex	Ne	6	2,7	5
Bell	Ano	4	29,25	27
UPS M2	Ne	4	1,8	19
airbus	Ne	8	4	3

Tabulka 1 Přehled zásilkových dronů

V České republice první zásilku pomocí dronu doručil internetový obchod Mall.cz v roce 2016. K doručení byla použita kvadrokoptéra DJI Matrice 100, která je schopná nést balíček o hmotnosti 1,2 kg a má dolet 3,5 km. Dron byl řízen na dálku operátorem, ale disponoval systémy pro plně autonomní provoz. Cesta ze skladu k zákazníkovi měřila 1,7 km a trvala 3 minuty. [7]

Mezi hlavní nevýhody multikoptér patří energetická náročnost. Pro svůj let musí nést celou svoji hmotnost pomocí motorů, zatímco letoun s křídly potřebuje jen výkon na překonání aerodynamického odporu a potřebný vztlak už vytvoří křídla. Kvůli tomu multikoptéry potřebují výkonnější motory a baterie s větší kapacitou, a tím roste hmotnost a cena letadla.

Samotná koncepce autonomního doručování zásilek dronem narazila na několik problémů. Na drony společnosti Wing, které v australském městě Canberra testovala společnost Google, přišlo mnoho stížností ohledně jejich hlučnosti. Australská vláda se proto rozhodla udělat na hlučnost dronů vlastní posudek a dospěla k závěru, že pro další testování bude třeba zažádat o povolení k provozu tak hlučných letounů. [8]

Další potencionální problém může být bezpečnost v případě selhání jednoho motoru. Kvadrokoptéra je bez jednoho motoru prakticky neřiditelná a vzniká tedy riziko ublížení na zdraví či majetku v případě pádu. V případě, že dron má více než 4 motory, existuje možnost řízeně nouzově přistát. Letoun s porouchaným motorem je stále řiditelný a má možnost doklouzat na místo, kde přistání způsobí co nejméně škod. Možným řešením je instalování padáku na letoun, který v případě nouze zajistí bezpečné dosednutí na zem. Pro jeho správnou funkci je třeba, aby měl čas se rozvinout, což limituje jeho účinnost v nízkých výškách. Dalším řešením by mohla být instalace motorů s dvojím vinutím, které v případě poruchy zajistí alespoň částečný tah motoru.

Vzhledem k možnému použití ve městě je třeba také vyřešit problém s výběrem vhodné plochy pro přistání a předání zásilky. Přistání na ulici mezi lidmi rozhodně není bezpečný způsob. Shazování zásilky na padáku může poškodit obsah balíčku. Místo dopadu je navíc velmi ovlivněno povětrnostními podmínkami. Další možností je zřízení speciálních přistávacích ploch, kde by si lidé z okolí mohli převzít svoji zásilku. Po městě lze rozmístit speciální výdejní boxy, které budou zásobovány dronem. Po doručení zásilky do boxu bude adresát informován, že je jeho zásilka na místě, obdrží kód a s jeho pomocí si zásilku z boxu odebere.

Pro předání zásilky bez nutnosti přistání lze použít balíček upevněný na lano, který se spustí dolů k adresátovi, ten si ho odebere, lano se navine zpět a dron odletí pro další

zásilku [4]. Takovéto řešení se jeví nejvhodnější z výše zmíněných. Předávání zásilek není vázáno na jedno místo, jako přistávací plochy nebo výdejní boxy, a zároveň se eliminuje riziko úrazu nebo poškození dronu. Hlavní nevýhoda tohoto způsobu předávání je, že po celou dobu musí být zapnuté motory, což se projeví vyšší spotřebou energie.

1.2. Stanovení mise

Tato práce se zabývá návrhem dronu na doručování balíčků v České republice. Pro tyto potřeby byl zvolen operační dosah letounu 10 km. Takovýto dosah je dostatečný, pro rozvážení zásilek po Praze a blízkém okolí. Dron by měl unést balíček o hmotnosti 2 kg. Maximální délka tohoto balíčku je 300 mm, výška 250 mm a šířka 250 mm. Takovýto prostor by měl být dostatečný pro přepravu velké škály zboží.

1.3. Dynamika letounu a multikoptéry

Pohyb multikoptéry a letounu je velmi rozdílný. Následující kapitoly jsou věnovány jejich výhodám a nevýhodám.

1.3.1. Dynamika multikoptéry

Multikoptéra je druh helikoptéry, která má více než 2 rotory. Podle přesného počtu se dále rozlišují na kvadrokoptéry, hexakoptéry, oktakoptéry a další. Takovéto letadlo nedisponuje pevnými nosnými plochami. Celá dynamika kvadrokoptéry se odvíjí od sil vyvozených jejími motory. Stoupání zajišťuje společný tah všech 4 motorů. Pro klopení je třeba, aby dvojice předních motorů snížila / zvýšila tah a dvojice zadních motorů tah naopak zvýšila / snížila. Vzniklý rozdíl tahů vytvoří moment, který otočí kvadrokoptéru podél požadované osy. Klopení funguje na stejném principu jenom se mění rychlost otáček motorů levé strany vůči pravé straně.

K zatáčení se využívá specifického rozložení směrů otáček motorů. Motory umístěné úhlopříčně by se měly otáčet stejným směrem, s tím, že jedna úhlopříčka má směr rotace opačný oproti druhé úhlopříčce. Aby kvadrokoptéra zatočila, motory na jedné úhlopříčce sníží otáčky a motory na druhé je zvýší. Tím vznikne nerovnováha momentů vzniklých rotací vrtulí a dron se otočí okolo svislé osy. Rozložení motorů na dronu má také efekt, že při změnách otáček pro klopení nebo klonění nedochází k zatáčení, protože suma točivých momentů je rovna nule.

Pokud budeme uvažovat pohyb ve 3 dimenzích, tudíž se 6 stupni volnosti, kvadrokoptéra je schopná sama od sebe stoupat, klonit, klopit a zatáčet, ale pro pohyb vpřed, vzad, vlevo a vpravo je nutné celý stroj naklonit nebo naklopit do požadovaného směru a využít tahu motorů pro zrychlení. Jakýkoliv takový náklon redukuje sílu, kterou motory vyrovnávají tíhu dronu.

$$m_{kv} \times g = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \times \cos\Phi \times \cos\Theta \quad (1)$$

Jak je patrné z rovnice (1), pro větší úhel náklonu je potřeba větší tah motorů, aby dron při zrychlování neztrácel výšku. O to, aby k tomu nedocházelo, se stará PID regulátor, který v takovémto případě zvýší otáčky motorů. Řízení výšky je popsáno v kapitole 3.1.2. Vyšší otáčky znamenají vyšší spotřebu energie.

Naklápění a naklánění kvadrokoptér je velice snadné, protože motory mívají velké rameno od těžiště, kde je soustředěna většina hmotnosti dronu, a tudíž jsou momenty setrvačnosti nižší. Zatáčení není tak lehké vzhledem k tomu, že takovéto stroje většinou disponují malými vrtulemi, a i přes vysoké otáčky motorů nebývá rozdíl momentů veliký.

1.3.2. Dynamika letounu

Aby křídla vytvářela požadovaný vztlak, musí se letoun pohybovat určitou minimální rychlostí. Rychlost letu je řízena tahem motoru. Úhel podélného sklonu a výška letu je regulována pomocí výchylky výškového kormidla, které vytváří moment kompenzující klopivý moment křídel a ostatní momenty působící na letoun. Vodorovné ocasní plochy (VOP) je třeba umístit do vhodné vzdálenosti od těžiště letounu, aby aerodynamické síly působící na VOP mohly vyvodit dostatečný moment.

Obdobně se ovládá příčný náklon a kurz letu. Křidélka jsou k maximalizaci klonivého momentu umístěna na koncích křídel, stejně jako je vodorovná ocasní plocha umístěna, co nejdál od těžiště je konstrukčně možné. Křidélka se vychýlí každé na jinou stranu, a tím vytvoří moment, který řídí úhel náklonu nebo kompenzuje točivý moment vrtule.

K otáčení okolo svislé osy letounu slouží svislá ocasní plocha. Bývá umístěna společně s vodorovnou ocasní plochou na ocasu letounu. Používá se převážně ke stabilizaci stroje a drobným korekcím kurzu letu. Ke změně kurzu se ale používají křidélka.

Při pohybu letounu je jeho tíha vyrovnávána vztlakovou silou generovanou křídly, při dané rychlosti. Tah motoru musí vyrovnat odporovou sílu generovanou drakem letounu. Odporová síla je několikanásobně menší než tíhová síla.

2. Návrh letounu

Pro potřeby zvolené mise je třeba stanovit vhodnou koncepci letounu. Stroj musí být schopný kolmého vzletu a přistání – VTOL (Vertical Take Off and Landing), musí rychle uletět požadovanou vzdálenost a unést balíček až k zákazníkovi. V praxi je využita koncepce s pevnou nosnou plochou, která zajišťuje rychlý a ekonomický let mezi základnou a adresátem. Použití křídel je energeticky výhodnější než použití multikoptéry.

Pro kolmý vzlet je letoun vybaven 4 motory, pevně umístěnými na gondolách na křídlech. O pohon při dopředném letu se stará jeden tažný motor. Tato koncepce neodpovídá ani koncepci titl-wing, ani titl-rotor. Oproti oběma koncepcím je méně nákladná na konstrukci draku letounu. Přechod do vodorovného letu by měl být rychlejší, protože už od počátku lze využít plný tah motoru a není třeba brát v potaz naklápění křídel nebo motorů. Na druhou stranu, všechny visové motory jsou značnou část letu nevyužity. Gondoly zvyšují aerodynamický odpor, ale nárust nebude tak výrazný.

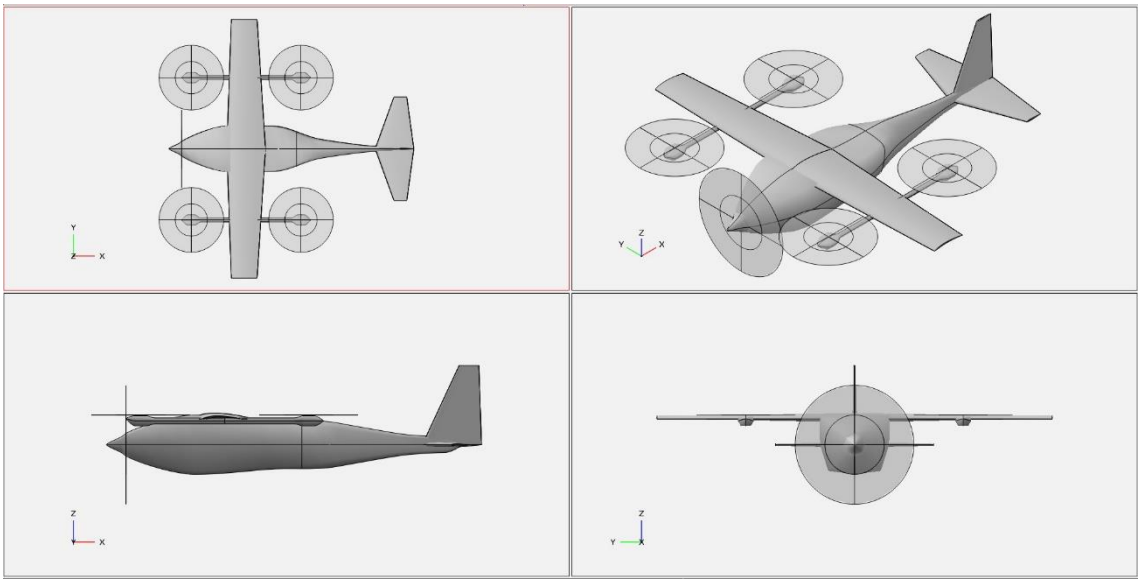
Kombinace letadla a kvadrokoptéry funguje následovně. Je využito užitečných vlastností kvadrokoptéry, jako je kolmý vzlet a přistání, její schopnosti zastavit se ve vzduchu a možnosti přesně a obratně se pohybovat na malém prostoru ve fázi vzletu, přistání a předávání zásilky. K přesunu mezi skladem a adresátem je využito rychlosti a ekonomičnosti provozu letounu s pevnou nosnou plochou. Takto vzniká kombinace stroje, který dokáže urazit potřebnou vzdálenost v krátkém čase a zároveň je schopný přesně zastavit na místě, kde si adresát převezme svůj balíček.

Balíček je převážen uvnitř letounu. Výsledný aerodynamický odpor tak je nižší, než kdyby byl balíček zavěšen pod trupem. Předání zásilky adresátovi proběhne tak, že dron zastaví ve vzduchu na předem určeném místě, třeba před domem adresáta, ve výšce několika metrů nad zemí, otevře dolní dvířka a spustí balíček dolů, kde jej adresát převezme. Dron navine lano zpět, zavře dvířka a může začít nabírat výšku pro návrat na základnu, kde se buď dobije, nebo převezme další balíček.

Letoun je jednodušší konstrukce, a tudíž i levnější na výrobu, je méně energeticky náročný pro přelety na delší vzdálenost, ale o něco těžší, než by za daných podmínek mohl být při použití jiného uspořádání.

2.1. Návrh geometrie letounu

Na začátku návrhu letounu nebylo snadné stanovit základní parametry. Pro stanovení potřebné kapacity baterií bylo třeba znát provozní výkony motorů, které vyžadovaly znalost hmotnosti letounu, což zase závisí na výkonu motorů a kapacitě baterií, protože výkonnější motory a baterie s větší kapacitou váží více. Aby bylo možné se dostat z tohoto kruhu, byl nejdříve navržen tvar letounu, jeho rozměrů a profilu křídla, protože tyto parametry jsou nejméně ovlivněny všemi ostatními. Změna odhadované hmotnosti letounu se projevuje pouze změnou letové rychlosti letounu. Pokud by došlo k výrazné změně průměrů použitých vrtulí, stačilo by pár drobných úprav letounu.



Obrázek 3 Letoun navržený v OpenVSP

Pro vytvoření geometrie letounu a základní aerodynamické simulace byl použitý software OpenVSP. Jedná se o volně přístupný software pro parametrický návrh geometrie letounu, vyvinutý inženýry z NASA. Jako první byl v programu vytvořen box o rozměrech nákladu, který je třeba dronu převážet. Díky tomu bylo možné začít stavět celý letoun kolem balíčku, aby bylo zajištěno, že se celý vejde dovnitř.

Po několika pokusech s různými parametry bylo navrženo štíhlé křídlo s rozpětím 1,7 m. K výběru profilu křídla došlo až po přibližně přesném odhadu celkové hmotnosti. Je třeba vyjít z rovnováhy vztlakové a tíhové síly popsané v rovnici číslo (2).

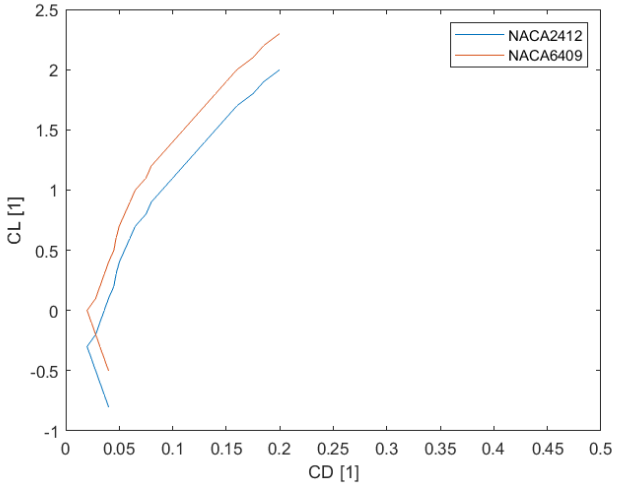
$$m \times g = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times S_k \times C_L' \tag{2}$$

Z programu OpenVSP je známá referenční plocha křídla S_k. Jako hmotnost m je dosazený odhad celkové hmotnosti letounu a rychlost v je definována jako cestovní rychlost, kterou by se dron mohl pohybovat. Po úpravě rovnice je možné stanovit návrhový koeficient vztlaku C_L' a s ním začít hledat mezi leteckými profily NACA vhodný profil, který vyhovuje požadavkům. Byl zvolen nesymetrický profil NACA-6404, který má odpovídající koeficient vztlaku pro přímý let a zároveň má velmi dobrý poměr vztlaku a odporu.

Navržené parametry křídla		
Profil	NACA 6404	[1]
Plocha křídla	0,5	[m^2]
Rozpětí	1,7	[m]
Štíhlost	5,78	[1]
Kořenová tětiva	0,3	[m]
Koncová tětiva	0,2	[m]

Tabulka 2 Výsledná geometrie křídla

Po vymodelování letounu a stanovení profilu křídla je třeba stanovit základní aerodynamické vlastnosti letounu. Pro tyto potřeby disponuje OpenVSP programem pro stanovení parazitiního odporu, vlastností profilu křídla a funkcí Wave drag, která počítá odpor vzniklý při letech nadzvukovou rychlostí. Pro řešený letoun je očekávána maximální rychlost menší než 150 km/h, proto je tato část odporu zanedbatelná.



Obrázek 4 Porovnání poláry zvoleného profilu s profilem NACA 2412

Pro výpočet vztlaku v programu OpenVSP je zvolena metoda Vortex Lattice Method (dále jen VLM). VLM je numerická metoda založená na použití mřížky diskrétních vírů. Tato metoda počítá s několika předpoklady:

1. Neuvažuje stlačitelnost a viskozitu tekutiny.
2. Zanedbává tloušťku křídla. Vztlakové plochy mají tloušťku jdoucí k 0.

Touto metodou lze získat koeficient vztlaku, koeficient klopivého momentu a indukovaný odpor profilu. Vzhledem k tomu, že se zanedbává vazké chování vzduchu, je třeba použít ještě nástroj pro stanovení parazitického odporu a sečíst je pro stanovení celkového odporu. Ten počítá odpor, který vzniká kvůli viskozitě vzduchu, odpor tvaru letounu a interferenční odpor, vznikající například v místě připojení křídla k trupu letounu.

2.2. Odhad hmotnosti

Protože bude vytvořen pouze zjednodušený návrh letounu nebudou k dispozici přesné hmotnosti jednotlivých komponent, a proto je nutné je odhadnout. Odhad celkové hmotnosti má vliv na hmotnost jednotlivých komponent, a proto je odhadovaná váha letounu výsledkem několika odhadů. Aby se snížil počet nutných iterací pro odhad hmotnosti letounu, bylo uvažováno se zvýšenými váhami některých komponent.

2.2.1. Odhad hmotnosti draku letounu

Váha letounu je ovlivněna řadou parametrů jako jsou třeba rozměry, vnitřní konstrukce a použité materiály. Z těchto parametrů budou známy pouze rozměry, proto bylo nejjednodušší najít vztah mezi rozpětím, délkou a hmotností letounu.

Jméno	Délka [mm]	Rozpětí [mm]	Hmotnost [g]	Poměr hmotnosti ku délce a rozpětí [g/dm2]
Razzia	1998	1940	6200	16,00
Decatlon	3170	4580	28900	19,91
Hangar 9 Carbon Club	2920	4220	27000	21,91
Hangar 9 Bronco	2870	2743	19000	24,13
Dolphin Jet	2100	1980	11000	26,46
Black Horse	2237	3580	19000	23,72
Ki-43 Oscar	1892	2235	12700	30,03
Extra NG	2470	2630	12600	19,40
Fw-190	2230	2600	15000	25,87
Pitts S-2B	1778	1819	10000	30,92
P-40	1940	2275	10000	22,66
MiG-29	2030	1420	7800	27,06
Fi-156C	1910	2850	8100	14,88

Tabulka 3 Porovnání hmotností a rozměrů RC modelů

Všechna tato data se dala najít na stránkách internetového obchodu s leteckými modely. Je vhodné vybrat modely podobných rozměrů, jaké bude mít výsledný letoun. Po sestavení tabulky bylo možné spočítat průměrný poměr hmotnosti ku součinu délky a rozpětí. Rozměry navrhovaného letounu je třeba změřit v programu OpenVSP a pak lze dopočítat odhadovanou hmotnost letounu. Vzhledem k tomu, že většina porovnávaných modelů letadel disponuje spalovacími motory a jejich hmotnost byla zahrnuta v jejich specifikacích, tak je průměrný poměr hmotnosti trochu vyšší, než bude u tohoto letounu. Z důvodu nepřesného odhadnu hmotnosti všech komponent bude tento nárůst hmotnosti představovat část váhy dílů, které jinde zohledněny nebyly.

Z těchto údajů lze určit průměrnou hodnotu poměru $23{,}3\ kg/dm^2$. V programu OpenVSP je třeba změřit délku letounu $L = 1500\ mm$ a rozpětí křídel $b = 1700\ mm$. Z těchto údajů je nutné dopočítat odhadovanou hmotnost draku letounu $m_L' \doteq 5{,}9\ kg$.

2.2.2. Odhad hmotnosti motorů

V kapitole 2.3.1. bude popsán postup, jakým byly vybrané vrtule pro oba letové režimy, tj. stoupání v režimu kvadrokoptéry a dopředný let. Tímto postupem zároveň stanovíme výkony pro daný letový režim. Pro získání poměru výkonu a hmotnosti je třeba opět sestavit tabulku z modelářských BLDC (Brushless direct current – bezkartáčový stejnosměrný) motorů. Pro odhad hmotnosti je třeba najít motory různých výkonů. Pro získání hmotnosti motorů stačí vydělit požadovaný výkon průměrným poměrem výkonu a hmotnosti. Požadovaný výkon by měl být větší něž stanovené výkony, protože byly počítány v ustáleném stavu a nebyl brán ohled na nárůst výkonu při zrychlování.

Jméno	Výkon [W]	Hmotnost [g]	Poměr výkon a hmotnosti [W/g]
Power 360	6500	1240	5,24
Xpwr	6000	1168	5,14
AXI 5330	2220	672	3,30
OMA 5025	1600	405	3,95
OMA 5020	1764	350	5,04
Axi 2820	530	197	2,69
Axi 2820/12 V2 long	650	158	4,11
Compact HPD 6443	1500	860	1,74
ARES pro	390	178	2,19

Tabulka 4 Přehled dostupných BLDC motorů

Průměrná hodnota poměru výkonu a hmotnosti je $3{,}71\ W/g$. V kapitole 2.3.2. jsou určené výkony motorů a lze stanovit odhadovanou hmotnost motorů $m'_M \doteq 0{,}9\ kg$.

2.2.3. Odhad hmotnosti baterií

Dolet je jeden z nejdůležitějších faktorů dobrého doručovacího dronu. V kapitole 2.3.2. bude popsán postup odhadu kapacity baterie. Pro stanovení hmotnosti baterie je třeba znát poměr kapacity a hmotnosti baterie. Ke stanovení tohoto poměru je vhodné vycházet z dat o kvalitních bateriích s velkou kapacitou.

Jméno	Kapacita [mAh]	Napětí [V]	Výkon [Wh]	Hmotnost [g]	Poměr výkonu a hmotnosti [Wh/kg]
Gens Ace Lipo Tattu	10000	22,2	222	1300	170,77
Spektrum Smart LiPo	5000	14,8	74	495	149,49
Black Magic LiPol	6500	14,8	96,2	589	163,33
Traxxas LiPo	6700	14,8	99,16	644	153,98

Tabulka 5 Přehled dostupných akumulátorů

Z této tabulky lze dopočítat průměrnou hodnotu poměru, která po zaokrouhlení vychází na $159\ Wh/kg$. Pomocí toho poměru a požadovaném výkonu stanoveném v kapitole 2.3.2. lze dopočítat, že odhadovaná hmotnost baterií bude $m'_B \doteq 2{,}5\ kg$.

2.2.4. Celkový odhad hmotnosti

Když známe hmotnost balíčku a odhadované hmotnosti komponent, je možné stanovit celkovou odhadovanou hmotnost letounu.

Komponenta	Hmotnost [kg]
Drak letounu	5,9
Motory	0,9
Baterie	2,5
Balíček	2
Ostatní součástky	1
Celková odhadovaná hmotnost	12,3

Tabulka 6 Výsledek odhadu hmotnosti

V položce ostatní součástky je zohledněno, že se letoun neskládá pouze z výše zmíněných komponent, ale pro správnou bude disponovat řídící jednotkou, řadou senzorů a dalších dílů.

2.3. Výběr pohonu

Pohon letounu se skládá ze 4 základních částí: vrtulí, motorů, regulátorů a baterie. Jako první je navržena vrtule a od ní se odvíjí návrh baterie. U motorů je třeba jen stanovit výkony vrtule, které slouží k odhadu hmotnosti motorů.

2.3.1. Výběr vrtule

Základní požadavek pro výběr vhodné vrtule je, aby dokázala vytvořit dostatečný tah na překonání tíhové nebo odporové síly. Předpokládá se, že pro visení a dopředný let vyjdou různé vrtule, protože se značně liší rychlostní poměry, ve kterých pracují. Práce vychází z experimentálních měření charakteristik modelářských vrtulí ve větrném tunelu [10]. Jsou uvažovány vrtule, které byly měřeny ve stejných podmínkách se stejným poloměrem, ale různými stoupáními. Tomu vyhovují vrtule Master Airscrew o průměru 11 palců a stoupáním od 4 do 10 palců. Pro návrh vrtulí je zvolen takový model, že průměr je stanoven jako jeden parametr a k němu jsou uvažovány koeficienty tahu C_T a výkonu C_P dle nalezených dat jako funkce rychlostního poměru J a stoupání vrtule.

$$J = \frac{v}{n \times D} \tag{3}$$

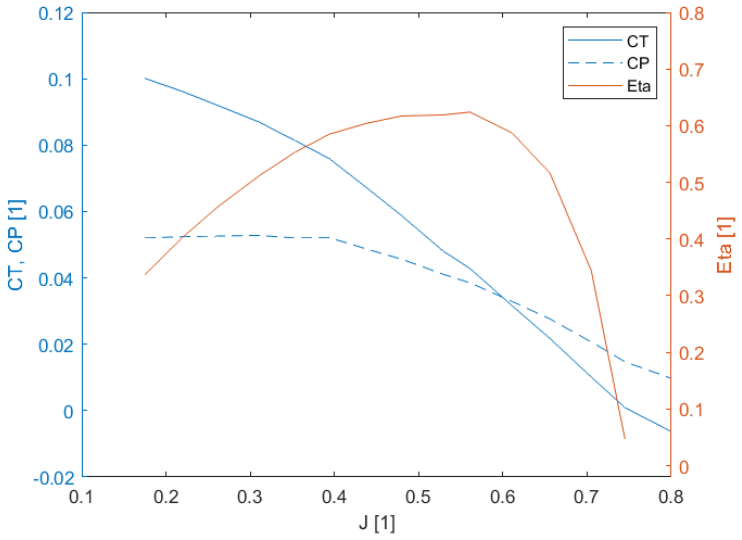
$$T = D^4 \times \rho \times C_T(J) \times n^2 \tag{4}$$

$$P = D^5 \times \rho \times C_P(J) \times n^3 \tag{5}$$

Volba vhodné vrtule vychází z rovnováhy vztahu (4) a odporové síly, kterou vrtule musí překonat. Takto lze sestavil závislost průběhu tahu na rychlostním poměru s tím, že odporová síla, rychlost a průměr vrtule jsou volené parametry a hustota vzduchu je uvažována jako konstantní hodnota. Otáčky motoru jsou funkcí rychlostního poměru. Je třeba nalézt otáčky, při kterých ses tahová a odporová síla rovnají. Souběžně s tahem se počítal výkon vrtule při daných otáčkách a cílem je najít vrtuli, která při těchto podmínkách a parametrech pracuje s co nejnižším výkonem, a tudíž nejnižší spotřebou energie.

Vrtule pro multikoptéru jsou dvoulisté, protože je možnost je během letu natočit tak, aby měly co nejmenší aerodynamický odpor. Jako vstupní parametry je zvolena odporová síla odpovídající 1/4 odhadované hmotnosti dronu a určena rychlost stoupání na 5 ms^{-1}. Vrtule o průměru 0,5 m a stoupání 8 palců poskytuje požadovaný tah při nižším výkonu.

Vrtule pro vodorovný let je pouze jedna, a proto je použita vrtule většího průměru, a to 0,6 m. Rychlost je uvažována 27 ms^{-1}, což by mělo přibližně odpovídat cestovní rychlosti. Jako síla, kterou musí vrtule překonat, byla původně použita pouze odporová síla, která na letoun působí při cestovní rychlosti. Vzhledem k tomu, že na takto stanoveném výkonu závisí hmotnost letounu a výběr baterie, je k aerodynamické odporové síle přičtena složka hmotnosti, která při stoupání působí proti tahu motoru. Tím pádem narůstá výkon motoru, což by mělo zajistit spolehlivější odhad spotřeby energie a hmotnosti baterie.



Obrázek 5 Parametry zvolené vrtule [10]

Po provedení návrhu tažných a visových vrtulí podle výše popsaného postupu vychází, že minimální výkon v obou letových režimech mají vrtule se stoupáním 8 palců. Bylo předpokládáno, že na dronu budou použity 2 různá stoupání vrtulí, kvůli rozdílným podmínkách, ve kterých pracují. Tento výsledek mohl být způsoben chybně zvolenou metodikou výběru vrtulí nebo tím, že výpočet vychází pouze z dat měřených pro jedny otáčky vrtule, při kterých byly její charakteristiky měřeny.

2.3.2. Výběr baterií

Pro potřeby odhadu hmotnosti je třeba stanovit, kapacitu baterie potřebnou na splnění požadované mise. Celý tento postup je značně zjednodušený a je nezbytné pak v simulaci ověřit, zda je navržená kapacita baterie dostatečná pro provoz dronu.

Z návrhu vrtule jsou známé přibližné výkony potřebné pro visení a dopředný let. Letová hladina byla určená na 150 m, maximální rychlost stoupání 5 m/s a z těchto

údajů lze dopočítat čas, po který během vzletu jsou v provozu všechny 4 visové motory o celkovém výkonu 2600 W. Pomocí určené letové rychlosti 27 m/s a vzdálenosti k zákazníkovi 10 km lze stanovit dobu zapnutí dopředného motoru o výkonu 800 W.

Ve chvíli, kdy jsou známy výkony motorů a časy, je třeba dopočítat celkovou spotřebu energie. Je nezbytné vzít v potaz, že letoun vzlétá, přistává a taky se od zákazníka vrací na základnu. Dále je třeba vzít v potaz čas na předání zásilky, který je odhadnutý na 3 minuty. Z těchto hodnot lze stanovit, že pro provedení zásilky na 10 km je třeba 342 Wh energie. Letoun musí mít rezervu energie pro případ, že by byl nucen zůstat déle ve vzduchu nebo pro případ větší spotřeby z důvodu povětrnostních podmínek. Z těchto důvodů, a protože se jedná o velmi zjednodušený letový model bylo rozhodnuto zvednout potřebnou kapacitu baterie na 400 Wh.

2.4. Dynamika letu

Navrhovaný doručovací dron v sobě kombinuje 2 různé koncepce. To mu umožňuje pohybovat se jako letoun i jako multikoptéry. Pro popis pohybu ve dvoudimenzionálním souřadném systému je třeba zavést několik předpokladů:

1. Letoun je považován za pevné těleso. Není uvažována poddajnost a deformace konstrukce, což znamená, že vzdálenost jakýchkoliv dvou bodů na konstrukci letadla je konstantní po celou dobu letu.
2. Země je plochá a nepohyblivá. Zemská souřadná soustava je považována za inerciální vztažnou soustavu. Pokud by byl v práci řešen kromě i navigační systém, tak nelze nastolit tento předpoklad.
3. Hustota vzduchu je konstantní. Tento předpoklad lze použít, protože let dronu je simulován v malých výškách a změny hustoty vzduchu budou zanedbatelné. Pro lety s větší změnou letové výšky je třeba uvažovat hustotu vzduchu jako funkci výšky.
4. Hmotnost letounu se po bodu mise nemění. Tento předpoklad není úplně přesný, protože po předání zásilky je dron lehčí o její hmotnost. Uvažování konstantní hmotnosti zjednoduší simulaci, a zároveň vyloučí vliv hmotnosti balíčku a při posuzování spotřeby energie se výpočty nachází na straně bezpečnosti.

S pomocí 2. Newtonova zákona lze vyjádřit silové působení na letoun v jeho souřadné soustavě, která má počátek v těžišti letounu. Osa x je vodorovná a směřuje dopředu a osa y je na ni kolmá a směřuje nahoru [11].

$$\boldsymbol{F} = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt} = \frac{d(m \times \boldsymbol{v})}{dt} = m \times \boldsymbol{a} \tag{6}$$

Všechny vektory sil působících na letoun lze rozepsat do rovnic po složkách ve směru x a y. Jako první je určená tíhová síla **G**, kde m je hmotnost letounu, g je gravitační zrychlení a Θ je úhel náklonu letounu.

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -m \times g \times \sin\Theta \\ -m \times g \times \cos\Theta \end{bmatrix} \tag{7}$$

Další síly, které působí na letoun, jsou tahy jednotlivých motorů T, které je možné dopočítat ze vztahu (4) v závislosti na otáčkách motorů n. Ve dvoudimenzionálním souřadném systému není uvažován náklon kolem osy x, a proto lze uvažovat otáčky levých i pravých motorů shodné.

$$\boldsymbol{F_T} = \begin{bmatrix} T_5(n_5) \\ T_1(n_{1,2}) + T_2(n_{1,2}) + T_3(n_{3,4}) + T_4(n_{3,4}) \end{bmatrix} \tag{8}$$

Aerodynamické síly působí ve vlastním aerodynamickém souřadném systému, který má počátek shodný se souřadným systémem letounu jenom je pootočený o úhel náběhu α. Parametry pro výpočet získané z programu OpenVSP jsou: plocha křídla S_k, délka tětivy křídla c, koeficient odporu C_D, koeficient klopivého momentu C_M, a koeficient vztlaku C_L. Další veličiny jsou hustota vzduchu ρ, celková rychlost letounu v a rychlost ve směrech os v_x a v_y. S jejich pomocí lze vyjádřit úhel náběhu α, vztlakovou $\boldsymbol{F_{VZ}}$ a odporovou sílu $\boldsymbol{F_O}$ a klopivý moment $\boldsymbol{M_{KL}}$.

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \tag{9}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{-v_y}{v_x}\right) \tag{10}$$

$$\boldsymbol{F_{VZ}} = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times S_k \times C_L(\alpha) \tag{11}$$

$$\boldsymbol{F_O} = -\frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times S_k \times C_D(\alpha) \tag{12}$$

$$\boldsymbol{M_{KL}} = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times S_k \times C_M(\alpha) \times c \tag{13}$$

Vztlaková a odporová síla stanovená v aerodynamickém souřadném systému se následně musí převést do souřadného systému letounu.

$$\boldsymbol{F_{Aero}} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_O \\ F_{VZ} \end{bmatrix} \tag{14}$$

Pro ovládání letounu za letu se používá vodorovná ocasní plocha. Její moment je vyjádřen jako vztlaková síla ocasní plochy působící na rameni o délce vzdálenosti mezi výškovkou a těžištěm.

$$\boldsymbol{M_{VOP}} = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times S_{VOP} \times C_{L-VOP}(\delta) \times l_{VOP} \tag{15}$$

S takto vyjádřenými vektory sil je možné dosadit do 2. Newtonova zákona a rozepsat je do složek ve směrech x a y.

$$\boldsymbol{F_T} + \boldsymbol{F_{Aero}} + \mathbf{G} = m \times \boldsymbol{a} \tag{16}$$

$$T_5(n_5) + F_{AeroX} - m \times g \times \sin\Theta = m \times \ddot{x} \tag{17}$$

$$2 \times \left(T_1(n_{1,2}) + T_3(n_{3,4})\right) + F_{AeroY} - m \times g \times \cos\Theta = m \times \ddot{y} \tag{18}$$

K silovým rovnicím je třeba doplnit i rovnici momentovou. Z modelu v OpenVSP lze změřit vzdálenost mezi působišti tahů motorů a těžištěm letounu. Tyto vzdálenosti jsou níže značeny písmenem *l* s indexem příslušné síly.

$$T_5(n_5) \times l_{T5} + 2 \times \left(T_1(n_{1,2}) - T_3(n_{3,4})\right) \times l_{T1,4} - M_{KL} + M_{VOP} = I \times \ddot{\Theta} \tag{19}$$

Tyto diferenciální rovnice slouží jako základ pro simulaci letu.

3. Simulace letu

V předchozích kapitolách jsou stanovené některé parametry letounu a popsané diferenciální rovnice jeho pohybu. Toto všechno slouží pro validaci navržených a odhadnutých parametrů.

3.1. Simulink

Pro simulaci systémů s více vstupy a více výstupy, které obsahují diferenciální rovnice, je vhodný program Simulink, což je grafické programovací prostředí pro simulaci dynamických systémů založené na MATLABu. Tato simulace poslouží k ověření stanovených a odhadnutých parametrů a jako základ pro určení ekonomického přínosu doručovacích dronů.

3.1.1. Popis systému

Pro přehlednost se simulace v Simulinku skládají z takzvaných subsystémů. U těch lze nastavit počet vstupů a výstupů. Každý subsystém lze vytvořit tak, aby plnil zadanou funkci. Simulace je rozdělena na 6 subsystémů. Jeden vytváří vstupní hodnoty, druhý se stará o zpětnovazební řízení, třetí zastupuje vrtule a motory, čtvrtý počítá všechny síly působící na letoun, další počítá pohyb a poslední subsystém slouží pouze ke grafickému znázornění výsledků a není tudíž zcela nezbytný. Všechny subsystémy jsou navzájem propojeny přes vstupy a výstupy a vytvářejí celkový systém s více vstupy a více výstupy, neboli MIMO systém (multiple-input multiple-output).

Subsystém starající se o vstupní hodnoty funguje jako centrální počítač letounu. Říká mu, v jaké výšce má letět, jestli má mít zapnuté visové motory a tažný motor. U skutečného letounu by zde probíhalo plánování trasy a vytváření vstupních hodnot pro řízení letounu. Kromě toho jsou do tohoto bloku umístěny i parametry letounu, které se po validaci simulace můžou změnit, jako je hmotnost letounu a průměry vrtulí.

Otáčky stanovené v subsystému řízení slouží jako vstupy pro subsystém představujícím pohonnou sestavu letounu. Pomocí rychlostního poměru lze z tabulek interpolovat hodnoty koeficientu tahu C_T a koeficientu výkonu C_P. Použitím vztahů (4) a (5) se následně stanoví okamžitý tah motorů a výkon. Tahy motorů budou použity jako vstup následujícího subsystému. Z výkonů se integrací stanoví celková spotřebovaná energie.

Subsystém, který počítá všechny síly působící na letadlo k tomu potřebuje z ostatních subsystémů úhel náklonu, tahy motorů, úhel natočení VOP, rychlost letounu a parametry letounu.

Ze znalosti rychlosti, úhlu náběhu, hustoty vzduchu a plochy křídla lze dopočítat vztlakovou sílu podle rovnice (11), odporovou sílu (12) a klopivý moment (13). Ke klopivému momentu je třeba přičíst moment od vodorovné ocasní plochy, který se spočítá z rovnice (15). Po započítání tíhy letounu dostáváme levou stranu rovnice (17) a (18). Levou stranu rovnice (19) se stanoví v separátním subsystému.

Úpravou těchto 3 rovnic, aby se osamostatnili derivace na jedné straně získáme diferenciální rovnice. Jejich integrací se zabývá 5. subsystém, který poskytuje informace o rychlosti, poloze a úhlu náklonu. Zároveň zde dochází k přepočtu rychlosti a polohy do zemského souřadného systému. Tyto hodnoty jsou nezbytné pro řízení výšky v 2. subsystému.

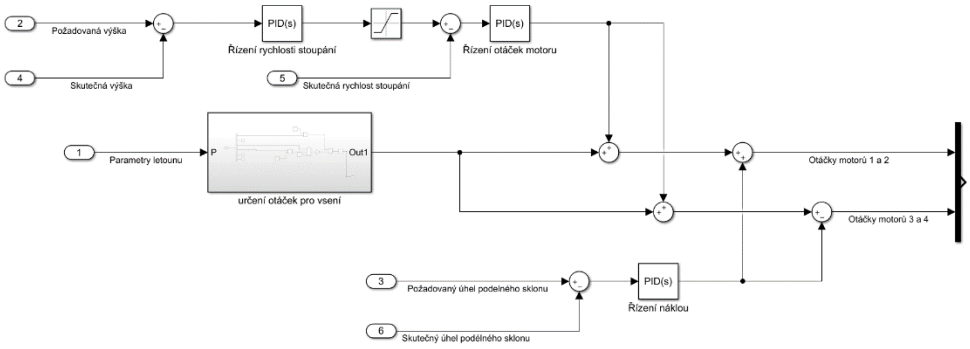
Simulink umožňuje umístění grafického zobrazení hodnot na jakékoliv místo v simulaci. Díky tomu lze sledovat průběh veličin během simulace a odladit případné chyby. Také je to neocenitelný pomocník pro nastavování parametrů PID regulátorů.

Nejdůležitější ze všech je subsystém se stará o řízení letounu. U letounu jsou řízeny následující veličiny: výška letu, rychlost stoupání, úhel náklonu a rychlost letu. Řízení lze rozdělit na 2 části: řízení kvadrokoptéry a řízení letounu.

3.1.2. Řízení kvadrokoptéry

Kvadrokoptéra se řídí pouze otáčkami motorů. Řízení otáček těchto 4 motorů je sestavené tak, že na začátku je subsystém, který z hmotnosti a parametrů vrtulí stanoví otáčky pro udržování výšky. K této hodnotně otáček se přičítá nebo odečítá akční odchylka získaná z PID regulátorů.

O regulaci výšky se starají 2 PID regulátory. První má na starosti podle skutečné a plánované výšky posoudit, jestli je nutné klesat nebo stoupat a jakou rychlostí. Tato rychlost jde přes saturační blok, který omezí maximální rychlost stoupání a klesání a po odečtení skutečné rychlosti stoupání slouží jako vstup pro druhý PID regulátor, který určí potřebnou změnu otáček motorů. Pro řízení náklonu je použitý jen jeden PID regulátor. Slouží ke kompenzaci momentu od tažné vrtule, který vznikne ve chvíli, kdy letoun začne přecházet do vodorovného letu [12].



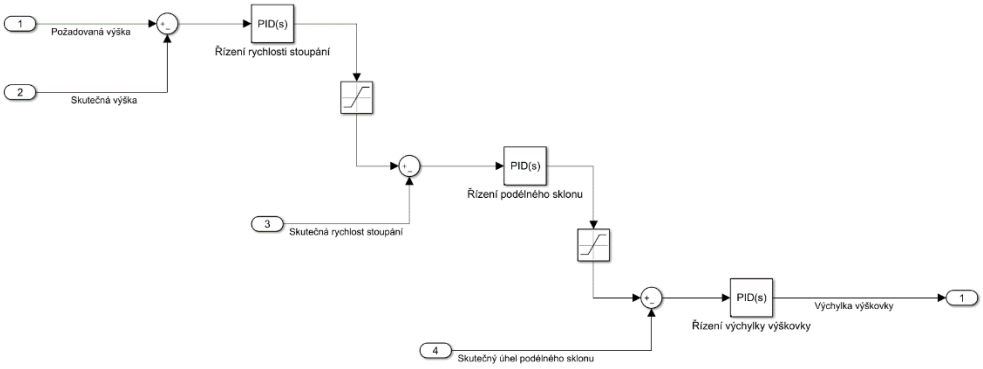
Obrázek 6 Schéma řízení výšky a podélného sklonu kvadrokoptéry

3.1.3. Řízení letounu

K řízení letounu se používá tah motoru a úhel natočení vodorovné ocasní plochy. Pro určení otáček motoru je použitý PID regulátor, který porovnává letovou a skutečnou rychlost. Letová rychlost je stanovena z hmotnosti, znalosti koeficientu vztlaku a plochy křídla tak, aby letoun letěl pod úhlem náběhu rovným nule, což by mělo zajistit nejekonomičtější let ze základny k zákazníkovi.

O řízení letové výšky se stará soustava celkem 3 regulátorů. První, P regulátor stanovuje rychlost stoupání nebo klesání podle rozdílu skutečné a požadované výšky. Po omezení maximální rychlosti a odečtení skutečné vertikální rychlosti slouží tato regulační odchylka jako vstup pro PID regulátor, který určuje potřebný podélný sklon letounu. Poslední PID regulátor se stará o určení výchylky VOP δ.

O řízení během přechodu ze svislého do vodorovného letu se ze začátku starají pouze motory kvadrokoptéry. Až letoun dosáhne cestovní rychlosti, tak se motory kvadrokoptéry vypnout a řízení podélného náklonu by mělo přejít na VOP. V takovémto případě v jednu chvíli vymizí moment, který vytváří motory kvadrokoptéry a VOP nestíhá včas zareagovat.



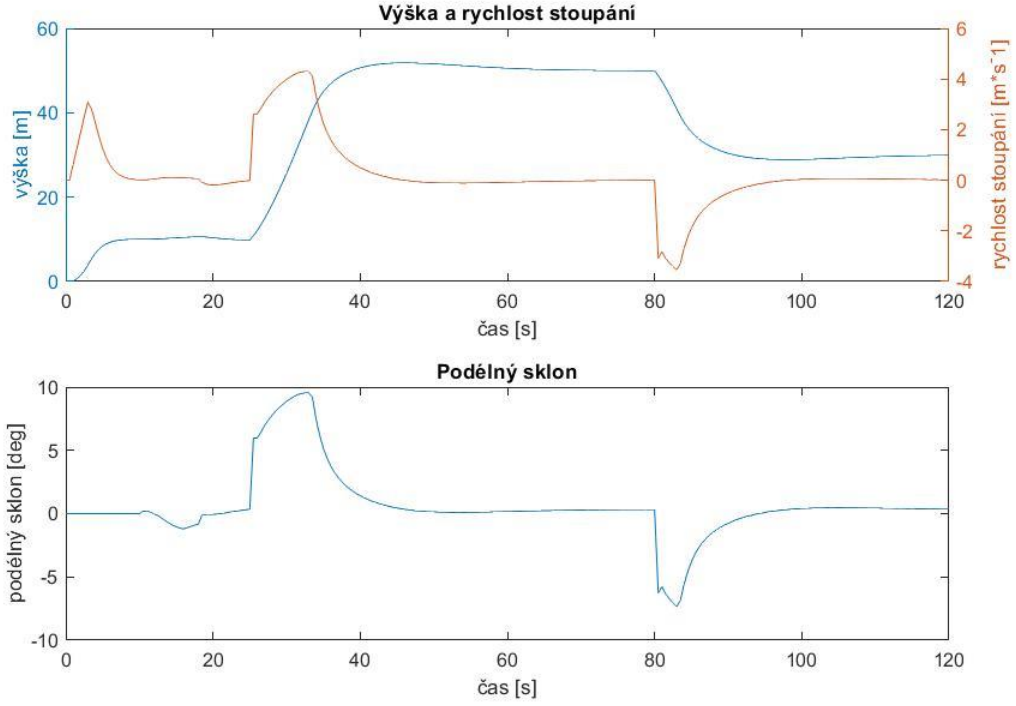
Obrázek 7 Schéma řízení pomocí výškovky

Proto je řízení pomocí VOP zapnuto pár vteřin před vypnutím motorů kvadrokoptéry. I v tomto případě dojde k rozhození stroje, ale není tak velké a VOP ho dokáže s přehledem srovnat. Výstupy tohoto subsystému jsou otáčky motorů a úhel natočení vodorovné ocasní plochy [13].

3.1.4. Simulace letu

Po sestavení modelu v Simulinku a naladění parametrů PID regulátorů bylo třeba provést několik simulací, které sloužili k validaci odhadnutých parametrů a k získání vstupních hodnot pro posouzení ekonomičnosti provozu.

Na následujícím obrázku lze vidět některé sledované parametry během simulace, která testovala řízení výšky. V tomto případě se jedná o výšku, rychlost stoupání a podélný sklon. Je zde dobře vidět kombinace kvadrokoptéry a letounu. Na začátku v čase nula sedí letoun na zemi, po chvíli začne stoupat a vystoupá do výšky 10 m pouze pomocí 4 visových motorů, vidíme, že podélný sklon se nemění. Letou přejde do vodorovného letu a v momentě, kdy dostane povel začít stoupat do 500m, změní se podélný sklon, letoun se natočí nosem vzhůru a stoupá do požadované výšky větší rychlostí, než prvně stoupala kvadrokoptéra.



Obrázek 8 Výstupy ze simulace letu

Simulace ukázala, že výkony v ustálených letových stavech odpovídají odhadnutým výkonům. Zvolená kapacita baterií je dostatečná pro let o délce 10 km, tj. dodání balíčku k adresátovi a návrat na základnu. Po návratu zbývá přibližně 20 % kapacity baterie jako rezerva. Vzhledem k tomu, že výkon potřebný pro visení asi 3krát větší než pro dopředný let, tak se bude velkou měrou podílet na celkové spotřebě energie. Proto byla provedena simulace, jakou vzdálenost by dron dokázal uletět cestovní rychlostí ve výšce 150 m. Celá baterie o kapacitě 400 Wh vystačí pro let na vzdálenost 47 km. Pokud se podaří zkrátit dobu, po kterou jsou v provozu visové motory, může dojít k nárůstu operačního dosahu.

3.2. Posouzení ekonomického dopadu

Doručovací dron je navrhován primárně pro užití v komerční sféře, a proto je nezbytné zhodnotit, zda se jeho použití finančně vyplatí. V následující části budou popsány výhody a nevýhody tohoto způsobu doručování zásilek a bude nastíněn koncept, který nejlépe využije jeho výhody.

Všechny dopravní a distribuční společnosti se potýkají s problematikou poslední míle, což je situace, že na poslední část cesty balíčku přichází větší množství nákladů a komplikací. Ve chvíli, kdy si firma může dovolit používat na dopravu zboží kamiony, letadla a případně i lodě, platí velké sumy za tyto dopravní prostředky, ale vzhledem k objemu nákladu, který lze takto přenést to vychází finančně dobře. Ve chvíli, kdy je třeba dovést balíčky ze skladu k zákazníkům začínají stoupat náklady na 1 zásilku, protože je nelze přepravovat v takovém množství. Optimalizace rozvážky na poslední míli je velmi důležitá pro všechny společnosti podnikající v tomto oboru.

3.2.1. Výhody dopravních dronů

Hlavní výhoda použití autonomních letounů je, že se řídí sami a odpadá potřeba platit řidiče. Jeden vyškolený operátor zvládne pracovat s více drony najednou. Při pohybu v městské zástavbě letadla nebrzdí provoz na zemi, uzavírky ulic ani dopravní značení, a proto se může pohybovat vyšší průměrnou rychlostí. Průměrná rychlost jízdy autem po Praze je pouze 37 km/h. Dron navržený v této práci se dokáže pohybovat s průměrnou rychlostí 67 km/h. Díky své rychlosti je ideálním kandidátem na rozvážkový stroj pro služby rychlého přepravy, například doručení do hodiny. Let k adresátovy na vzdálenost 10 km a předání balíčku trvá podle simulovaného letového modelu pouze 8 minut.

Díky objednání přes aplikaci nebo internetový prohlížeč si může zákazník přesně určit, kdy chce svoji zásilku obdržet. Tím lze redukovat čas strávený čekáním na zákazníka a předejít nezastižením adresáta, což má za následek opakované cesty s jedním a tím samým balíčkem.

Lehký elektrický letoun má navíc menší náklady na energii než běžný automobil nebo dodávka. Tomuto se více věnuje kapitola 3.2.3.

3.2.2. Nevýhody dopravních dronů

Vedle celé řady výhod má doručování dronem také několik nevýhod. Tou největší je bezpochyby, že dokážou přenést pouze jeden balíček a pak se musí vrátit na základnu pro nový. Tato zastávka může být spojena s dobíjením nebo výměnou baterií. Pro zajištění rozvozu stejného počtu balíčků, jako například dodávka, uletí letoun několikanásobně větší vzdálenost.

Plat operátora dronů bude vyšší než plat běžného skladníka, který by se dokázal postarat o několik dodávek během dne. Další nevýhodou letounů je, že je nemožné je používat při opravdu špatných povětrnostních podmínkách, které dodávky pouze zpomalí.

3.2.3. Porovnání letounu a dodávky

Na tomto zjednodušeném příkladu lze ukázat jedno z možných využití autonomních letounů pro snížení nákladů na dodávku zboží. Je dána fiktivní distribuční firma (FDF) se skladem v Modleticích, což je obec nedaleko od Prahy hned vedle dálnice D1. Tento sklad se zaváží pomocí kamionů a z něj se zásilky rozváží pomocí dodávek a dronů. Valná většina balíčků míří do Prahy, ale některé je třeba doručit do přilehlých obcí.

Následující model odpoví na otázku, jestli se vyplatí dodávku plnou zboží určeného na rozvoz do Prahy poslat s balíčkem do přilehlé obce nebo jestli bude levnější obsloužit tohoto zákazníka pomocí dronu? Pro stanovení délky trasy a času jízdy dodávky byly použity Google Mapy, vzdušná vzdálenost pro letoun byla určena pomocí měření v Google Earth.

Ze simulací letu bylo zjištěno, že průměrná spotřeba elektrické energie na 1 km je rovna *23,17 Wh/km*. Průměrná cena elektrické energie ze sítě byla v roce 2020 odhadována na *4,69 kWh/Kč*, takže let dronu stojí *0,11 Kč/km*. Pro porovnání budeme uvažovat dodávku s naftovým motorem, který má spotřebu *9 l/100km*. Průměrná cena nafty v lednu 2020 byla *32,19 Kč/l*. Pohonné hmoty pro dodávku budou stát *2,9 Kč/km*.

Jak zle vidět, náklady na palivo dodávky několikanásobně vyšší. Aby oba stroje stály v přepočtu na 1 balíček a na 1 km stejně, musela by dodávka přepravovat 27 balíčků. Pro řidiče dodávky stanovíme hodinovou mzdu na *300 Kč/h*.

Výpočet rozdílu nákladů je následující: máme stanoveno za jak dlouho se dostane řidič dodávky na Chodov, kde začne s rozvozem balíčků po Praze. Můžeme stanovit rozdíl ujeté vzdálenosti a času, pokud se dodávka odchýlí od nejkratší trasy. Známe plat řidiče i náklady na pohonné hmoty a můžeme tedy dopočítat kolik bude firmu stát takováto zajížďka. To můžeme porovnat s náklady, které se vynaloží na cestu letounu do cílového místa a zpět.

Dodávka			
Mezizastávka	Cíl	Čas [min]	Vzdálenost [km]
-	Chodov	15	12,6
Všetaty	Chodov	29	27,1
Sulice	Chodov	34	33,2
Svojetice	Chodov	47	39
Průhonice	Chodov	20	16,3
Letoun			
Mezizastávka	Cíl	Čas [min]	Vzdálenost [km]
-	Všetaty	10	5,8
-	Sulice	12	6,9
-	Svojetice	14	9,2
-	Průhonice	9	4,9

Tabulka 7 Porovnání nákladů při odchýlení z trasy

Srovnáním nákladů zjistíme, že i zajížďka do Průhonic, které jsou hned u sjezdu z dálnice po cestě do Prahy, znamená navíc skoro 36 Kč. Navíc ušetřený čas může řidič využít k rozvozu více balíčků. Pokud je ojedinělý cíl rozvážky situován směrem od Prahy, tak použitím dronu firma může ušetřit přes 200 Kč.

3.2.4. Vhodné využití letounu

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.2.1., tak drony se hodí pro rychlé dodávky zboží. Mimo to dokážou ušetřit náklady, pokud se nasadí na zásilky adresátů, kteří jsou daleko od ostatních. Pokud budou operovat z centra města, mohou využít své rychlosti a získat tak výhodu nad pozemní dopravou.

Prostředí doručovacích dronů se po technické stránce vyvíjí velkou rychlostí. Za předpokladu příznivých změn v legislativě, které by umožnili jejich větší využití lze očekávat rychlejší rozšíření po světe. Na mnoha místech už v praxi ukázali svůj potenciál. Není pochyb, že použití autonomních doručovacích letounů otevře nové

možnosti optimalizace doručení na poslední míli. Je nepravděpodobné, že takovéto drony v blízké době nahradí dodávky, ale přispějí k rychlejšímu a pohodlnějšímu doručení zásilky a přepravním společnostem ušetří prostředky. Podrobná ekonomická a logistická analýza této koncepce by dokázala lépe odhalit její silné a slabé stránky, ale není součástí této bakalářské práce.

4. Závěr

Cílem této práce bylo sestavit matematický model popisující let zásilkového letounu s kolmým startem a přistáním. První část práce byla zaměřena na porovnání v praxi používaných dronů pro přepravu zboží, zhodnocení jednotlivých koncepcí a stanovení mise.

Druhá část obsahuje návrh geometrie letounu včetně profilu křídla a numerických aerodynamických výpočtů, pro stanovení vstupních parametrů matematického modelu. Dále se zabývá určením vhodných vrtulí, odhadnutím potřebné kapacity baterií a odhadem hmotnosti letounu.

Třetí část se věnuje simulaci matematického modelu, návrhu řídících zákonů a posouzení ekonomického přínosu. V rámci simulace došlo k validaci stanovených a odhadnutých parametrů.

Tato práce může sloužit jako základ další práce, zabývající se návrhem konkrétních komponent pro VTOL letouny nebo na ní lze navázat logistickou a ekonomickou analýzou využitelnosti zásilkových dronů v komerční sféře.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] EDENHOFER, Alexander. DHL Parcelcopter. *Dpdhl.com* [online]. DHL [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: https://www.dpdhl.com/en/media-relations/specials/dhl-parcelcopter.html

[2] SEDLÁČEK, Vojtěch. DHL začíná v Číně doručovat zásilky autonomními drony. Přepravu zkrátí ze 40 minut na čtvrtinu. *Czechcrunch* [online]. 29. 5. 2019 [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: https://www.czechcrunch.cz/2019/05/dhl-zacina-v-cine-dorucovat-zasilky-autonomnimi-drony-prepravu-zkrati-ze-40-minut-na-ctvrtinu/

[3] Bell APT. *Bell* [online]. Bell [cit. 2021-5-26]. Dostupné z: https://www.bellflight.com/products/bell-apt

[4] POHL, Ondřej. V Austrálii už Google používá drony k doručování zásilek. *Fzone.cz* [online]. 12. 4. 2019 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://fzone.cz/clanky/v-australii-uz-google-pouziva-drony-k-dorucovani-zasilek-583

[5] MCNABB, Miriam. UPS Drone Delivery: DroneUp Flies to Prove the Case for Coronavirus Response. *Drone Life* [online]. 21. 4. 2020 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: https://dronelife.com/2020/04/21/ups-drone-delivery-droneup-partners-fly-to-prove-the-case-for-coronavirus-response/

[6] Airbus' Skyways drone trials world's first shore-to-ship deliveries. *Airbus* [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2019/03/airbus-skyways-drone-trials-worlds-first-shoretoship-deliveries.html

[7] Mall.cz úspěšně otestoval doručování dronem. Balíček předal za 3 minuty. *Mall* [online]. 22. 11. 2016 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.mall.cz/tiskova-zprava-16-11-22

[8] GOTHE-SNAPE, Jackson. 'Obnoxious' drone noise to get national review as hobby pilots, Google face crackdown. *ABC News* [online]. [cit. 2021-6-5].

Dostupné z: https://www.abc.net.au/news/2019-06-18/drones-noise-review-after-complaints-about-google-trial/11219808

[9] HEDDERGOTT, Andreas. DHL Parcelcopter 3.0. *RWTH Aachen University* [online]. [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: https://www.fsd.rwth-aachen.de/cms/fsd/Forschung/Projekte/~pcul/DHL-Paketkopter-3/lidx/1/

[10] BRANDT, John B., Robert W. DETERS, Gavin K. ANANDA, Or D. DANTSKER a Michael S. SELIG. UIUC Propeller Data Site. *UIUC Applied Aerodynamics Group* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html

[11] SONNEVELDT, Lars. *Nonlinear F-16 Model Description*. Nizozemsko, 2006. Delft University of Technology.

[12] Systémy řízení letu / Zdislav Pech, Vratislav Věk. - Vyd. 1. - Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. - 114 s.: obr., tab., schémata; 30 cm. - Vyd.: České vysoké učení technické v Praze,ISBN 80-01-03374-0

[13] HOW, Jonathan P. Aircraft Stability and Control. *MIT opencourseware* [online]. 2004 [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/lecture-notes/

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 DHL Parcelcoper 3.0 [9] 9
Obrázek 2 DHL Parcelcopter 4.0 [1] 9
Obrázek 3 Letoun navržený v OpenVSP 16
Obrázek 4 Porovnání poláry zvoleného profilu s profilem NACA 2412 17
Obrázek 5 Parametry zvoleného stoupáni vrtule [10] 22
Obrázek 6 Schéma řízení výšky a podélného sklonu kvadrokoptéry 28
Obrázek 7 Schéma řízení pomocí výškovky 28
Obrázek 8 Výstupy ze simulace letu 29

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Přehled zásilkových dronů 10
Tabulka 2 Výsledná geometrie křídla 17

Tabulka 3 Porovnání hmotností a rozměrů modelů 18
Tabulka 4 Přehled dostupných BLDC motorů 19
Tabulka 5 Přehled dostupných akumulátorů 20
Tabulka 6 Výsledek odhadu hmotnosti 20
Tabulka 7 Porovnání nákladů při odchýlení z trasy 32

SEZNAM POUŽITÉHO SOFWARU

MATLAB

Simulink

OpenVSP

SEZNAM PŘÍLOH

1_MRAZEK_matematicky_model.slx

2_MRAZEK_model_letounu.vsp3