

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba výrobních strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bezpilotní systémy pro speciální aplikace

Autor: **Martin ŠTELCICH**

Vedoucí práce: **Ing. Jiří BARTÁK**

Akademický rok 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin ŠTELCICH**

Osobní číslo: **S18B0107K**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**

Název tématu: **Bezpilotní systémy (UAV) pro speciální aplikace**

Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Proveďte rešerši techniky bezpilotních systémů a rešerši trhu s dostupnými systémy se zaměřením na komerční řešení. Dále vytvořte ucelený přehled legislativy pro provoz bezpilotních systémů v ČR a EU. Na základě získaných informací proveďte koncepční návrh bezpilotního systému pro vybranou aplikaci.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Rešerše techniky bezpilotních systémů.
2. Rešerše trhu bezpilotních systémů.
3. Legislativa bezpilotních systému v ČR a EU.
4. Koncepční návrh dronu na vybranou aplikaci.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **30-40 stran A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

KIMON P. VALAVANIS *Unmanned Aircraft Systems: The Current State-of-the-Art.*
Switzerland: Springer International Publishing, 2013

Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Barták**
Katedra konstruování strojů
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Barták**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2018**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2018

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Jiří Bartákovi za cenné rady, které mi během vypracovávání práce poskytl. Také děkuji své rodině a blízkým za jejich podporu při studiu.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Štelcich	Jméno Martin			
STUDIJNÍ OBOR	B2301 - „Stavba výrobních strojů a zařízení“				
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Barták	Jméno Jiří			
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKS				
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte		
NÁZEV PRÁCE	Bezpilotní systémy (UAV) pro speciální aplikace				
FAKULTA	Mechanical Engineering	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2019

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	43	TEXTOVÁ ČÁST	41	GRAFICKÁ ČÁST	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS</p> <p style="text-align: center;">ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL</p> <p style="text-align: center;">POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p style="text-align: center;">Bakalářská práce obsahuje stručný úvod do problematiky bezpilotních systémů a jejich částí. Dále obsahuje koncepční návrh letounu pro termodiagnostiku fotovoltaických elektráren.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA</p> <p style="text-align: center;">JEDNOSLOVNÉ POJMY,</p> <p style="text-align: center;">KTERÉ VYSTIHUJÍ</p> <p style="text-align: center;">PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">UAV, bezpilotní systém, koncepční návrh</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Štelcich		Name Martin		
FIELD OF STUDY	B2301 - „Design of Manufacturing Machines and Equipment“				
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Barták		Name Jiří		
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS				
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR		Delete when not applicable	
TITLE OF WORK	Unmanned systems (UAV) for special applications				
FACULTY	strojní	DEPARTMENT	KKS	SUBMITTED IN	2019

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALY	43	TEXT PART	41	GRAPHICAL PART	2
---------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This bachelor thesis contains a brief introduction to unmanned aircraft systems and parts of these systems. It also includes conceptual design of unmanned aircraft for thermography of photovoltaic power plant.
KEY WORDS	UAV, unmanned aircraft systém, conceptual design

Obsah

Abstrakt	3
1. Úvod.....	4
1.1. Definice	5
2. Technika bezpilotních systémů.....	6
2.1. Dělení bezpilotních letounů.....	6
2.1.1. Dle použití	6
2.1.2. Dle vzniku vztlaku (koncepce).....	7
2.1.3. Dle legislativy	11
2.2. Zdroje energie.....	11
2.3. Pohony	13
2.4. Navigace	15
2.4.1. Globální navigační satelitní systém (GNSS).....	15
2.4.2. Regionální satelitní navigační systém (RNSS)	15
2.4.3. Inerciální navigační systém	16
2.5. Ovládání.....	16
2.6. Řídící jednotka.....	16
2.7. ESC (Electronic Speed Controller).....	17
3. Současný trh s bezpilotními systémy	17
4. Legislativa bezpilotních systémů	20
5. Koncepční návrh bezpilotního systému	22
5.1. Úvaha.....	22
5.2. Volba koncepce letounu	24
5.3. Volba koncepce pohonu	25

5.3.1.	Predikce hmotnosti	25
5.3.2.	Volba motorů.....	25
5.3.3.	Roztečná kružnice umístění motorů	28
5.3.4.	Odhad potřebné kapacity baterie	30
5.3.5.	Skutečná hmotnost letounu	32
5.4.	Výběr baterie	33
6.	Závěr	35
	Zdroje	36
	Tabulky.....	39
	Obrázky	40
	Příloha č.1.....	41

Abstrakt

Cílem této práce je seznámení se základní terminologií týkající se bezpilotních systémů. Vysvětlit možné dělení těchto systémů a jaké technické prvky jsou u různých typů systémů využívány. Vzhledem k těmto různým typům se vztahuje také jejich použitelnost pro různé aplikace, ať už dle typu pohonu, systému letu nebo použitelnost dle užitečného zatížení.

V současné době jsou tyto systémy hojně používány pro široké spektrum různých aplikací a jedná se tedy o produkty, které se velmi rychle vyvíjejí. Z toho důvodu, že jsou bezpilotní systémy takto hojně používány a jsou dostupné i široké veřejnosti je nutné regulovat jejich použití. Touto problematikou se zabývá legislativa ČR i EU. I těmto omezením bude věnována část této práce.

Praktická část bude věnována návrhu bezpilotního systému pro termodiagnostiku solárních elektráren.

1. Úvod

Historie létání a myšlenek na sestavení létajících strojů sahá hluboko do minulosti. Ačkoliv některé tyto myšlenky byly dotaženy až k letu ať už za pomoci draků, horkovzdušných balónů, nebo vzducholodí, tak za milník v letectví považujeme první let bratří Wrightů, který uskutečnili 17. prosince 1903. Jednalo se zřejmě o první kontrolovaný let letounu těžšího než vzduch s vlastním pohonem, což je odlišuje od ostatních pokusů. Od té doby se letectví vyvíjelo mílovými kroky, první bezpilotní letoun existoval již v roce 1916. Tento bezpilotní letoun byl vyvinut ve Velké Británii a nazýval se Ruston Proctor Aerial Target. Letoun se zakládal na návrzích Nikoly Tesly a byl ovládán radiovým ovládáním, obdobně jako je tomu dnes, (nicméně tehdejší model byl na mnohem základnější úrovni).

Aerial Target byl v podstatě létající bombou, která měla útočit na Německé vzducholodě. Po několika neúspěšných startech byl projekt bezpilotních letounů ukončen s tím, že nemá velký vojenský potenciál. Toto tvrzení ale nemohlo být více mylné. Už o rok později přišli se svými návrhy v USA. Letoun s názvem Kettering Bug byl ale vyvinut příliš pozdě a nebyl nikdy nasazen v boji. Jak tomu již bývá, tak největšího a nejrychlejšího technologického pokroku je dosahováno během válek v zájmu získání výhody nad nepřítelem. Tudíž dalšího vývoje se bezpilotní letouny dočkaly ve druhé světové válce, následně i ve studené válce a celkově i nadále ve vývoji pro vojenské účely.

Historie nevojenských bezpilotních letounů začíná mnohem později, až v roce 2006, jak dokládá deník Wall Street Journal. Tehdy začaly být letouny používány například pro kontrolu potrubních tras, nebo pro postřik polí pesticidy. V tomto roce byla také poprvé vydána povolení k provozu nevojenských bezpilotních letounů od agentury ministerstva dopravy Spojených států (Federal Aviation Administration). Zpočátku byla povolení vydávána minimálně (po dobu osmi let tato agentura vydala průměrně dvě povolení ročně), poté se počty povolení začaly prudce zvedat a například už v roce 2016 jich bylo vydáno přes 3 000. Použitím bezpilotních letadel se zabývá i evropská legislativa, civilní letectví má v EU na starost agentura EASA (European Aviation Safety Agency). Legislativním požadavkům a omezením z pohledu ČR a EU bude věnována samostatná kapitola. [1]

1.1. Definice

Pro bezpilotní letoun se používá více zkratk a názvů a je tedy nutné si tyto pojmy jasně definovat. Jsou zde uvedeny všeobecně uznávané a nejčastěji používané zkratky. Pro popis pojmů použitých v české legislativě použiji definici z doplňku X leteckého předpisu L2, který se touto problematikou zabývá.

Bezpilotní letadlo (UA)

Letadlo určené k provozu bez pilota na palubě. V mezinárodním kontextu se jedná o nadřazenou kategorii dálkově řízených letadel, autonomních letadel i modelů letadel. Pro účely doplňku X leteckého předpisu L2 se tím rozumí všechna bezpilotní letadla kromě modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 25kg. Často se také uvádí zkratka UAV, což je ve své podstatě synonymum. Zkratky totiž znamenají unmanned aircraft (UA) a unmanned aerial vehicle (UAV). [2]

Autonomní letadlo

Letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu. Tento pojem nepopisuje přímo bezpilotní letoun, ale je velmi často zmiňován v kontextu právě s bezpilotními letouny. [2]

Bezpilotní systém (UAS)

Systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikační spojení a zařízení pro vypouštění a návrat. Bezpilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více. [2]

Model letadla

Letadlo, které není schopné nést člověka na palubě, je používáno pro soutěžní, sportovní nebo rekreační účely, není vybaveno žádným zařízením umožňujícím automatický let na zvolené místo, a které, v případě volného modelu, není dálkově řízeno jinak, než za účelem ukončení letu nebo které, v případě dálkově řízeného modelu, je po celou dobu letu pomocí vysílače přímo řízené pilotem v jeho vizuálním dohledu. [2]

Dálkově ovládaný systém (RPAS)

Jedná se o synonymum k bezpilotnímu systému, ale jde o formálně nejlepší zkratku. Jelikož název bezpilotní systém navozuje dojem spíše autonomního letadla. Oproti tomu je u názvu dálkově ovládaný systém jasné, že pilota má, i když ne na své palubě. Tento termín je také preferován agenturami zabývajícími se civilním letectvím. Například mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO), Evropská agentura pro bezpečnost letectví (EASA), nebo také Australská bezpečnost pro civilní letectví (CASA) [3]

Dron/Drone

Jedná se asi o nejvíce známý název, který je používán širokou veřejností. Slovo drone pocházející z Angličtiny přitom nemá nic společného s letadly. Původní význam slova je definován jako nízký, bzučivý, monotónní zvuk. Jelikož bezpilotní letadla často takový zvuk vydávají, tak je lidé začali označovat jako drony. Tento název je již zažitý ve spojení s bezpilotními letadly a velmi často se objevuje i v tisku.

2. Technika bezpilotních systémů

Tato část práce představuje techniku používanou a potřebnou k provozování bezpilotního systému a jeho různé technické charakteristiky. Jsou zde tedy popsány typy nejčastěji používaných systémů, jejich rozdělení, hlavní výhody a nevýhody. Kapitola se také věnuje zdrojům energie, typům pohonů, navigaci, ovládání a dalším technickým prvkům bezpilotních letounů.

2.1. Dělení bezpilotních letounů

Bezpilotní letouny je možné rozdělit podle různých charakteristik. Vždy záleží, co je od takového letounu očekáváno, a k čemu je určený. Bude zde uvedeno dělení podle charakteristik-použití, vzniku vzlaku a legislativy. Nejdůležitější charakteristikou pro určení typu letounu je způsob, jakým je docíleno vzlaku potřebného k letu. Pro toto dělení zde budeme uvažovat pouze letouny těžší než vzduch, které používají pohonnou jednotku.

2.1.1. Dle použití

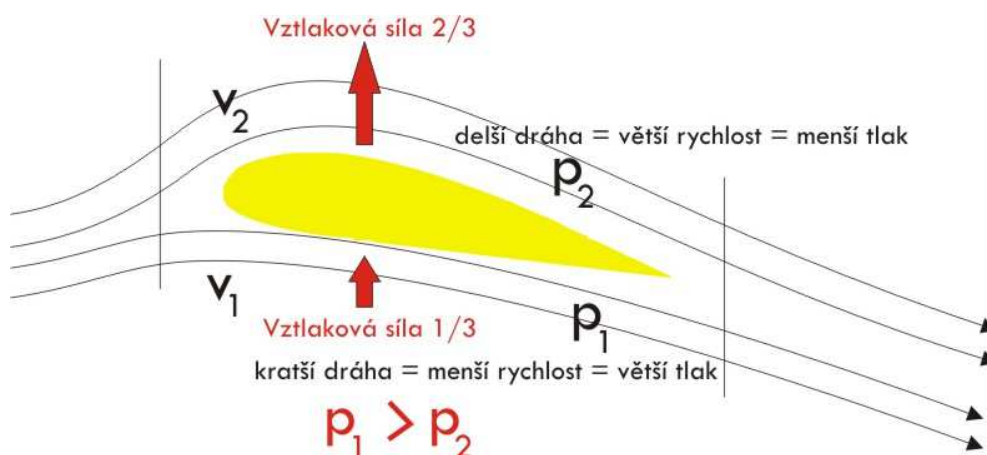
Dělení bezpilotních letounů podle použití je považováno za to nejzákladnější-vymezuje dvě základní kategorie využití a to vojenské, nebo civilní. Tyto kategorie se následně rozdělují i do dalších podkategorií, jak je uvedeno v tabulce.

Civilní	Vojenské
Sportovní	Špionážní
Komerční	Útočné
Hobby	Obrané

Tabulka 1 - Dělení dle použití

2.1.2. Dle vzniku vztlaku (koncepte)

U letounů těžších než vzduch je vztlak tvořen nosnými plochami, které jsou buďto pohyblivé, nebo nepohyblivé. Letouny s nepohyblivými nosnými plochami jsou jinak také nazývány jako fixed wing. Síla, vyvozená pomocí pohonu, slouží pouze k dosažení potřebné rychlosti, vztlak zde vzniká na nepohyblivých křídlech. Naopak letouny s pohyblivými nosnými plochami, nebo-li rotory, využívají pohon přímo ke vzniku vztlaku. Například helikoptéra je jednorotorový systém a i když má rotory dva, tak pouze hlavní rotor slouží je vzniku vztlaku, druhý rotor na ocasu je pouze směrový. Ostatní typy rotorových letounů lze obecně shrnout jako vícerotorové. Jejich přesnější název se pak odvíjí podle počtu rotorů. Zřejmě nejčastěji používaný vícerotorový letoun širokou veřejností je kvadrokoptéra.



Obrázek 1 – Tah křídla[4]

Fixed wing letouny

Jedná se o letoun s nepohyblivými nosnými plochami. Tato koncepce má své výhody i nevýhody, které prakticky určují její použitelnost pro určité aplikace. Princip letu u tohoto typu je shodný s letadly. Je tedy nutné letounu dodat dostatečně velkou rychlost, aby vztlak

vzniklý na jeho křídlech byl větší než součet všech odporových sil. Nejčastěji je tento letoun poháněn vrtulí, která je otáčena elektromotorem, případně spalovacím motorem umístěným uvnitř těla letounu.

Jednou z hlavních výhod tohoto systému, která souvisí s jednodušší údržbou a také nižší cenou, je jednoduchost oproti letounům s pohyblivými nosnými plochami. Vzhledem k principu letu je nutné mít velmi dobrou aerodynamiku, která umožňuje létat vysokou rychlostí s nízkým odporem a také možnost plachtění. Tyto vlastnosti přímo souvisejí s delším doletem, jelikož je zapotřebí mnohem méně energie k letu.

Oproti tomu zřejmě největší nevýhodou je potřeba vzletové/přistávací dráhy. Dále není možné, aby letoun zůstal „stát“ ve stacionární poloze, jelikož potřebuje neustálý dopředný pohyb. Z toho plyne, že se u tohoto systému vylučuje využití pro aplikace, kde je stacionární poloha zapotřebí, jako například inspekce mostních konstrukcí či solárních elektráren. Naopak je velice vhodný pro aplikace kde je zapotřebí dlouhého doletu a nachází mnohé uplatnění u armády, jako například špionážní letoun. [5]

Na obrázku níže můžeme vidět jak takový fixed wing letoun může vypadat.



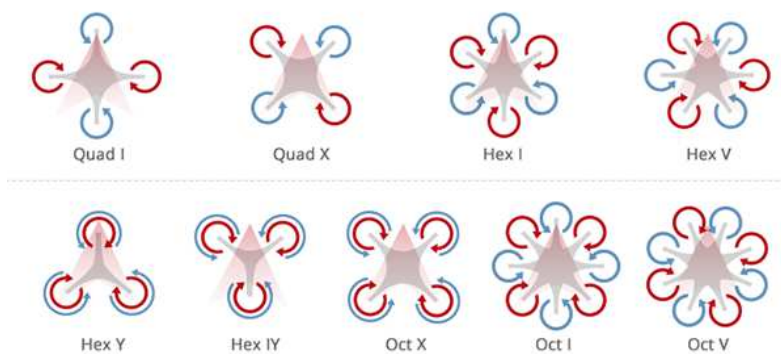
Obrázek 2 – Fixed wing letoun [6]

Letouny s pohyblivými nosnými plochami

Nosné plochy u těchto letounů jsou označovány jako rotory a vlastně se jedná o vrtule, které slouží přímo ke vzniku vztlaku. Koncept je možné použít ve velké škále modifikací podle

počtu rotorů a také dle tvaru konstrukce. Každá z jednotlivých modifikací má vlastní výhody a nevýhody, ale hlavní výhody i nevýhody celého systému jsou pro všechny shodné.

Největší výhodou je možnost vertikálního vzletu a tedy možnost vzlétnout a přistát na velmi malém prostoru. To znamená, že tam, kam je možné daný letoun položit, tak je odtud možné vzlétnout a také zde přistát. Tento fakt vyplývá z toho, že rotory slouží přímo ke vzniku vztlaku. Tyto systémy jsou vhodné například pro inspekční činnosti, nebo pro pořizování fotografií a videozáznamů. Jejich let je ale velmi energeticky náročný a nemají tedy příliš dlouhý dolet ani dobu letu. [5] Nyní si popíšeme nepoužívanější modifikace těchto letounů, které můžeme vidět na obrázku níže.



Obrázek 3 – Modifikace vícerotorových letounů [7]

Quadrokoptéra

Jedná se o nejčastěji používaný typ, který má čtyři ramena a ke každému z nich je připojen jeden motor. Tato konstrukce je nejjednodušší a vyskytuje se ve více formacích jako například X, nebo I. Motory na vedle sebe ležících ramenech musí mít opačný směr otáčení kvůli vyrovnání momentových reakcí. Nejčastěji se tato konstrukce používá pro hobby nebo sportovní účely. [8]

Hexakoptéra

Tato konstrukce je již složitější a vyskytuje se ve více formacích, jak je ukázáno výše. V případě konstrukce se šesti rameny je ke každému rameni připojen jeden motor. V konstrukci se třemi rameny nese každé rameno motory dva. Nejčastěji se tato konstrukce využívá pro pořizování fotografií, videozáznamu, nebo také k přepravě větších nákladů. [8]

Oktokoptéra

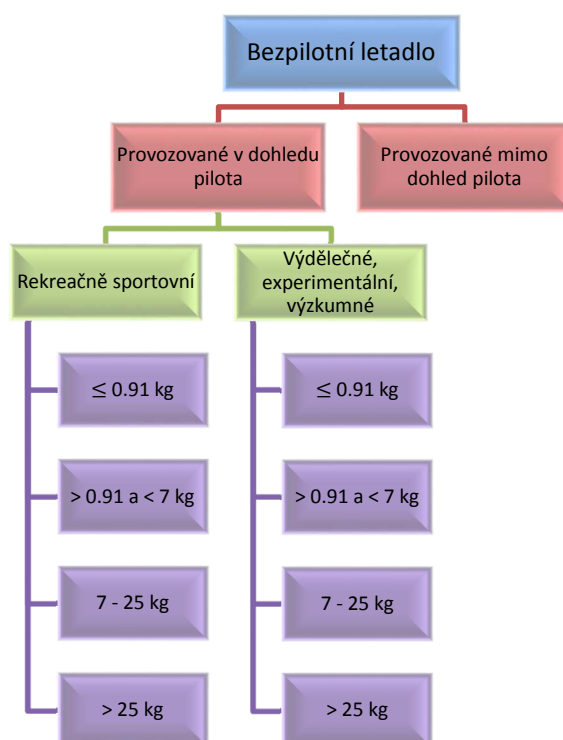
Obdobně jako u předchozích konstrukcí se i tato vyskytuje ve více konfiguracích a to s osmi rameny, na nichž je po jednom motoru, nebo se čtyřmi rameny, kde jsou na každém rameni motory dva (znázorněno v obrázku). Nejčastější použití je shodné s použitím hexakoptéry, ale oproti hexakoptéře je tato konstrukce stabilnější a zvládá větší zatížení. [8]

Koncepte	Výhody	Nevýhody
Kvadroptéra	Jednoduchost Nízká hmotnost	Při selhání motoru nebo rotoru následuje nevyhnutelný pád
Hexakoptéra	Při selhání motoru nebo rotoru je stále možné bezpečně přistát Více rotorů = větší tah (možnost větších zatížení) Stabilní let	Více součástek Složitější konstrukce Větší hmotnost Větší odběr energie
Oktokoptéra	Při selhání motoru nebo rotoru je teoreticky možné stále bezpečně letět Větší tah než předchozí varianty Stabilnější let než předchozí varianty	Více součástek Složitější konstrukce Větší hmotnost Větší odběr energie

Tabulka 2 - Výhody a nevýhody modifikací [8]

2.1.3. Dle legislativy

Jelikož se legislativa zabývá regulací používání bezpilotních letounů, tak má zavedený systém dělení, dle kterého se tyto systémy dělí a následně se jich týkají určité omezení. Zde si uvedeme toto rozdělení z pohledu ČR. Regulací se zabývá doplněk X leteckého předpisu L2, ze kterého toto dělení vyplývá.



Obrázek 4- Dělení dle doplňku X [2]

Na schématu můžeme vidět hierarchii dělení, ze které následně plynou požadavky na provoz jednotlivých kategorií. Blíže si tyto požadavky popíšeme v kapitole, která je věnována pouze legislativě.

2.2. Zdroje energie

Zdrojů energie, které jsou zapotřebí pro pohon bezpilotního letounu, je v dnešní době velké množství. Použitelnost různých zdrojů je závislá jak na vlastnostech daného zdroje, tak i na vlastnostech celého systému, pro který je zdroj určen. Nelze tedy posuzovat pouze energetický zdroj, nýbrž se musí posuzovat celek (energetický zdroj + pohonný systém). A to z toho důvodu, že každá pohonná jednotka má různou účinnost, tedy využitelnost dodané energie je odlišná jedná-li se o elektromotor, nebo spalovací motor. Tato část se zabývá zdroji energie bezpilotních letounů.

Baterie

Největší výhodou na bateriích je jejich struktura. Mohou být přepravovány bez žádných velkých omezení a jejich výměna je velmi snadná nahrazením staré, nebo poškozené baterie za novou. Mezi nejčastěji používané baterie u bezpilotních letadel jsou lithium-polymerové (Li-Po) a lithium-iontové (Li-Ion) baterie. Jsou relativně malé a mají vysoké vybíjecí proudy, je možné je použít napřímo k pohonu elektromotorů. Nicméně i když se jedná o zdroj nejpoužívanější tak je to současně i zdroj s největším omezením z důvodu jeho energetické hustoty. Chceme-li posouvat hranice letového výkonu, tak se musí stát baterie menšími a lehčími. Přidáním více baterií totiž neprodloužíme dobu letu a ani nezvýšíme nosnost daného letounu a to z důvodu navýšení hmotnosti systému samotnými bateriemi. [9] [10]

Vodíkové palivové články

Elektrická energie získávaná pomocí palivových článků je nazývána „čistým zdrojem energie“ jelikož přímo nevytváří žádné škodliviny. Jediným jejím odpadem je v podstatě voda. Palivový článek slouží k přímé přeměně chemické energie na energii elektrickou a je tvořen anodou, katodou a membránou nebo elektrolytem. Na anodu je přiváděn vodík, který zde díky katalytické příměsi na povrchu disociuje na kladné ionty a elektrony. Membrána či elektrolyt oddělující katodu od anody umožňuje průchod pouze iontům (protonům). Elektrony přitom procházejí elektrickým obvodem a jsou příčinou vzniku elektrického proudu. Následně dochází ke sloučení protonů a elektronů s oxidačním činidlem na katodě. Zde pak vznikají odpadní látky, kterými je v případě vodíkového článku voda. Velkou nevýhodou těchto článků je relativně vysoká hmotnost a velký objem v závislosti na složitosti systému. Tento zdroj energie zároveň není možné použít napřímo k pohonu elektromotorů, většinou slouží k dobíjení baterie, která zde musí být použita. [11]

Benzín, kerosin, methanol, ethanol, LPG

Tyto zdroje energie jsou používány ve spojení se spalovacími motory. Používané spalovací motory jsou robustní, kompaktní a mají dobrou spotřebu. Jelikož tato paliva uchovávají velké množství energie, tak je možné dosahovat velkých letových výkonů. Další obrovskou výhodou je úbytek paliva v průběhu letu. Čím déle tedy letoun letí, tím se spotřebovaným palivem klesá jeho hmotnost, a je tedy zapotřebí menšího tahu k udržení letu. Jejich velkou nevýhodou je vznik škodlivých emisí, ať už výfukových anebo hlukových. Další nevýhodou je složitost celého systému, což je činí nepoužitelné pro malé bezpilotní letouny. Tento zdroj

je sice možné použít přímo k pohonu vrtule, nicméně je zde horší přesnost ovládní oproti elektromotorům.

Solární energie

Dalším tzv. čistým zdrojem energie je získávání solární energie pomocí fotovoltaických článků. Tato koncepce je velmi moderní, je založena na principu přeměny slunečního záření na stejnosměrný elektrický proud pomocí fotoelektrického jevu na polovodičových diodách, kterým se říká fotovoltaické články. Tyto články jsou většinou z křemíku. I přesto, že se účinnost článků stále zvyšuje a jsou běžně schopny získávat okolo $175\text{W}/\text{m}^2$, tak pro pohon bezpilotního letounu pouze tímto zdrojem energie by musely články zabírat velkou plochu letounu, například celou plochu křídel. Může ale velmi dobře fungovat jako doplňkový zdroj energie pro zvětšení doletu. [12]

Laser

Funkce získávání energie pomocí laseru je ve své podstatě shodná s principem přeměny solární energie. Je tedy založena na fotovoltaickém jevu, s tím rozdílem, že funkci slunce zde zastává laser. Obrovskou výhodou je fakt, že pomocí laseru je možné na malou plochu článku přenést mnohem více energie oproti slunci. S tím ale souvisí problém, kterým je možné přehřívání článků, které vede ke snižování jejich účinnosti. Dalším problémem je zaměření laseru na velmi malý cíl. Nicméně například u již existujícího letadla Stalker UAV byl tento systém použit a mohl létat ve výšce 4 500 m s laserem ve vzdálenosti až 250 km. [13]

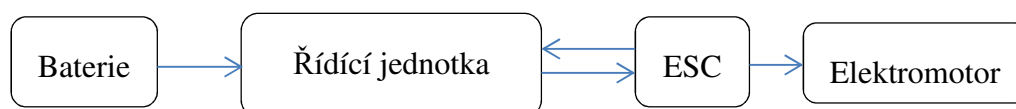
Přímé spojení s pozemním zdrojem elektrické energie

Existují systémy, které mají zdroj energie umístěný na zemi a jsou napájeny pomocí dlouhého kabelu. Takto napájený bezpilotní letoun má prakticky neomezenou dobu letu, jelikož není vázán na zdroj energie umístěný na své palubě. Pro určité aplikace může být tato vlastnost nesmírně užitečná. Nicméně sám napájecí kabel je i největší nevýhodou takového zdroje energie. Dolet i výška letu takového letounu je totiž omezena maximální délkou kabelu. Ten zároveň navyšuje celkovou hmotnost letounu, kterou letoun musí táhnout.

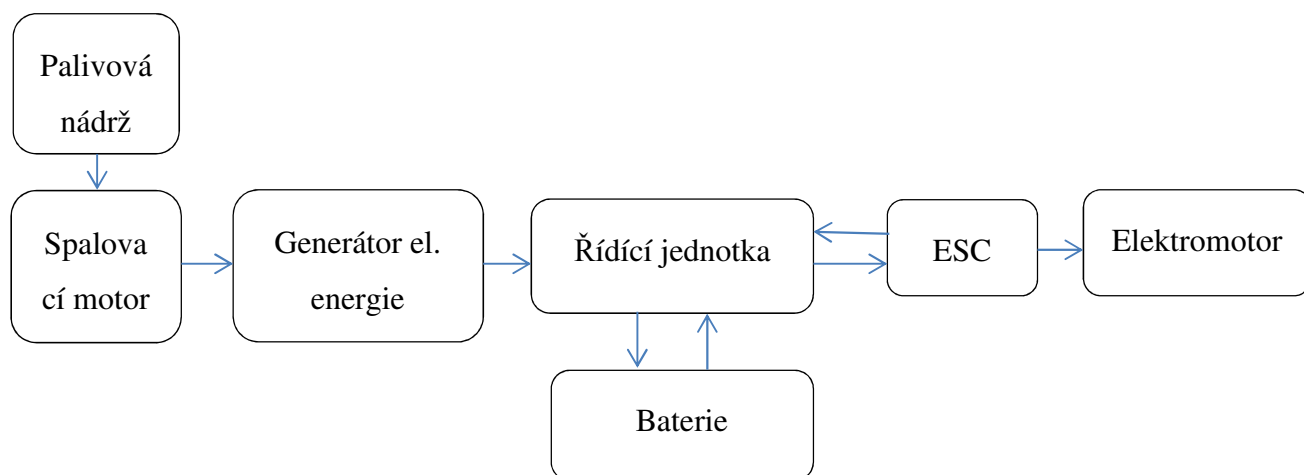
2.3. Pohony

Kompletní pohon se skládá z více částí a jeho skladba je závislá na zvolené koncepci- například dvě multikoptéry, které shodně používají elektromotory s vrtulemi. Jeden z těchto letounů odebírá energii přímo z baterií a oproti tomu druhý využívá energii z benzínu pomocí

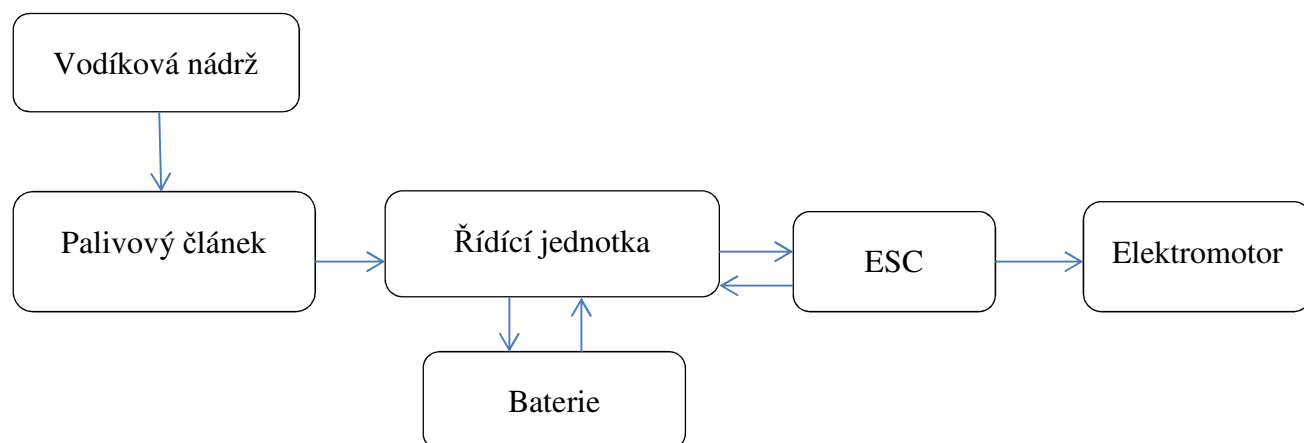
spalovacího motoru, který zde sloužit jako pohon generátoru elektrické energie. Je evidentní, že skladba obou pohonů bude odlišná a samozřejmě jinak složitá. Nicméně každá taková koncepce pohonu má své pro i proti a vždy záleží na tom, pro jakou aplikaci je daný letoun určen a jaké jsou na něj kladeny požadavky. Protože různé zdroje energie mají různou energetickou hustotu, je nutné posoudit pohon jako celek vzhledem k účinnosti systému a právě také složitosti celého systému.



Obrázek 5 – Schéma pohonu při použití baterií



Obrázek 6 – Schéma pohonu při použití spalovacího motoru



Obrázek 7 – Schéma pohonu při použití palivových článků

2.4. Navigace

Navigace je pro bezpilotní systémy nesmírně důležitá. Zejména pro ty, které jsou ovládány mimo dohled pilota a zajisté i pro autonomní systémy. Existuje více typů navigačních systémů. Zřejmě nejznámějším je systém GPS, ale existují i jiné navigační systémy-ať už se stejným principem nebo systémy fungující jiným způsobem. S vybranými typy navigačních systémů se zde seznámíme.

2.4.1. Globální navigační satelitní systém (GNSS)

Jedná se o družicový polohový systém s globálním pokrytím, kde malý přijímač na základě přijatých signálů z družic určí svoji polohu. Pro přesné určení polohy v čase je zapotřebí signál nejméně ze čtyř družic, čím více družic tím přesnější výsledek. Tyto systémy jsou obecně schopny určit polohu s přesností na centimetry, nicméně není možné je použít v budovách, nebo v husté městské zástavbě-tedy všude tam, kde je problém s příjmem signálu. Systémy založené na GNSS jsou uvedeny v tabulce. [14]

Název	Původ	Plná funkčnost
Navstar GPS	USA	1994
Glonass	Rusko	2011
Galileo	EU	2019
BeiDou-3	Čína	2020

Tabulka 3 - Globální navigační systémy [14]

2.4.2. Regionální satelitní navigační systém (RNSS)

Stejně jako u GNSS se jedná o družicový polohový systém, který funguje na stejném principu, nicméně pouze s regionálním pokrytím. Většinou fungují jako doplnění GNSS, nebo jsou jeho vývojovým předchůdcem jako například u Čínského BeiDou, který plynule přechází k GNSS.[14]

Název	Původ	Plná funkčnost
QZSS	Japonsko	2018
IRNSS	Indie	2016
BeiDou	Čína	-

Tabulka 4 - Regionální navigační systémy [16]

2.4.3. Inerciální navigační systém

Inerciální navigační systém nebo-li IMU (Inercial Measurement Unit) se skládá z velmi přesných gyroskopů a akcelerometrů, na základě kterých systém vyhodnocuje změnu polohy vůči výchozímu bodu. Používá se jako doplnění GPS v místech, kde dojde ke ztrátě signálu, dokáže po krátkou dobu dobře určovat polohu vůči výchozímu bodu, ale s rostoucím časem však roste také odchylka.

2.5. Ovládání

Dálkové ovládání bezpilotního letounu se skládá ze dvou prvků, kterými je vysílač v ovladači (ten má pilot v ruce) a přijímač umístěný na letounu. Princip spočívá v tom, že impulsy, udávány pohybem ovládacích páček, jsou vysílány vysílačem v ovladači a přijímány přijímačem na letounu. Zde jsou tyto informace vyhodnoceny řídicí jednotkou, která na základě těchto impulsů určuje pohyb letounu. [15] Je nutné, aby měl ovladač dostatečný počet kanálů, jeden kanál totiž odpovídá jednomu povelu letounu. Standardně by pro multikoptéry mělo stačit čtyř kanálové ovládání, které zajišťuje klonění (rotace kolem příčné osy), klopení (rotace kolem podélné osy), bočení (rotace kolem svislé osy) a plyn. Při potřebě ovládání například kamery, nebo jiných funkcí pilotem, je nutné zvolit ovládání s dostatečným počtem kanálů a to samé platí i o přijímači. Kanál znamená počet různých frekvencí v daném frekvenčním pásmu. Aby se dané kanály nerušily, tak musí mít mezi sebou rozstup v řádu desítek MHz. [16]

2.6. Řídicí jednotka

Řídicí jednotka je mozkiem bezpilotního letounu a skládá se z mikroprocesoru a senzorů – tří gyroskopů a tří akcelerometrů, tedy jednoho pro každou osu. Jednotka neustále vyhodnocuje informace o náklonech a rychlostech letounu a zároveň bere v úvahu signály přijaté přijímačem, tedy pokyny pilota. To je potřeba ke stabilnímu a přesnému ovládání letounu.

Jednotka může obsahovat i další senzory, jako například barometrický senzor pro určení výšky letu v závislosti na tlaku vzduchu, nebo magnetometr jako elektronický kompas. Dále je možné k jednotce připojit i externí senzory, jedním z nich je ve většině případů GPS. Součástí jednotky může být i PDB (Power Distribution Board), tedy deska, která zajišťuje rozvod napětí z baterie k jednotlivým prvkům letounu. [17]

2.7. ESC (Electronic Speed Controller)

Jedná se o regulátory, které slouží k řízení otáček jednotlivých elektromotorů na základě povelů řídicí jednotky. Regulátor také přeměňuje stejnosměrný proud baterie na proud střídavý, a je nutné, aby byl regulátor specifikován pro napětí, kterým bude letoun poháněn a aby byl schopen přenést proud, který jednotlivé motory odebírají.

3. Současný trh s bezpilotními systémy

Cílem praktické části je návrh bezpilotního systému pro termografii, proto je vhodné v této části uvést systémy které lze v současnosti pro danou aplikaci zakoupit, případně systémy univerzální, ale pro tuto aplikaci také použitelné.

Altura Zenith ATX8

Profesionální řešení pro inspekční činnosti jakou je právě i termodiagnostika. Jedná se o relativně kompaktní řešení s dvojicí motorů na čtyřech ramenech. Tyto motory jsou umístěny na roztečné kružnici o průměru 600 mm.



Obrázek 8 – Altura Zenith ATX8 [18]

DJI Matrice 600 Pro

Hexakoptéra s šesti rameny a elektromotory umístěnými na roztečné kružnici o průměru 1133 mm. Slouží k profesionálnímu leteckému snímkování.



Obrázek 9 – DJI Matrice 600 Pro [19]

Yuneec Torndo H920 Plus

Hexakoptéra s šesti rameny a elektromotory umístěnými na roztečné kružnici o průměru 920 mm. Jedná se o inspekční letoun, který sice nemá termokameru, ale dala by se zde použít.



Obrázek 10 – Yuneec Tornado H920 Plus [20]

Tarot T960

Hexakoptéra s šesti rameny a elektromotory umístěnými na roztečné kružnici o průměru 960 mm. Jedná se o univerzální letoun pro všestranné použití s možností různého užitečného zatížení.



Obrázek 11 – Tarot T960 [21]

Níže můžeme vidět srovnání zmíněných letounů vzhledem k hmotnosti, koncepci, kapacitě baterie a době letu. Uvedená vzletová hmotnost je myšlena bez užitečného zatížení, kterým je v našem případě gimbal, termokamera a vysílač. Přičtením této hmotnosti by se snížila doba letu.

	Altura Zenith ATX8	DJI Matrice 600 Pro	Yuneec tornado H920 Plus	Tarot T960
Koncepce	X8	X6	X6	X6
Baterie [mAh]	20 000	5 700	4 000	30 000
Vrtule [mm]	431,8	533,4	439,42	457,2
Doba letu [min]	40	30	24	42
Vzletová hmotnost [kg]	6,65	10	4,9	8,8

Tabulka 5 – Porovnání prodávaných letounů [21][22][23][24]

4. Legislativa bezpilotních systémů

Používání bezpilotních letadel je v dnešní době velmi hojně rozšířeno ať už mezi státními složkami, specializovanými společnostmi, tak i mezi širokou veřejností. Proto je z důvodu zajištění bezpečnosti nutné nastavit pravidla pro jejich použití a provoz. Tato pravidla jsou stanovena legislativně a zabývá se jimi jak samotný stát, tak i legislativa EU. Tato část práce se zabývá jednotlivými legislativními úpravami na poli bezpilotních letounů.

V Evropské unii byla na základě nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1592/2002 přijata společná pravidla v oblasti civilního letectví a byla zřízena Evropská agentura pro bezpečnost letectví (EASA), která je nápomocná Evropské komisi při přípravě opatření. [25] Veškerá pravidla vycházející na základě nařízení Evropského parlamentu jsou platná pro všechny členské státy, tedy i pro ČR, kde se bezpilotními systémy zabývají letecké předpisy.

Letecké předpisy řady L jsou v České republice uveřejňovány Ministerstvem dopravy ČR prostřednictvím Letecké informační služby (LIS) státního podniku Řízení letového provozu ČR (ŘLP ČR, s.p.). Úřad pro civilní letectví připravuje návrhy jejich znění, a to převážně na základě standardů a doporučených postupů ICAO.[26] Konkrétně se bezpilotními systémy zabývá letecký předpis L12, Doplněk X, jehož rozsah působnosti „stanovuje závazné národní požadavky na provoz, údržbu, změny a provoz bezpilotních systémů splňujících kritéria přílohy II nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 216/2008 v platném znění a je doporučeným postupem pro provoz modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 25 kg“ a ustanovení o prostorech použije i pro modely letadel do 25 kg.[2] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 216/2008, na které Doplněk X odkazuje, je již nahrazeno nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139, kde jsou veškeré hlavní požadavky na bezpilotní letadla sepsána v příloze IX tohoto nařízení.

Pravidla platná dle Doplněku X můžeme vidět v tabulce, která stanovuje podmínky pro evidenci pilota, letounu, nebo nutnosti dozoru, povolení a například i výši pojištění na základě jak hmotnosti letounu, tak i účelu jeho použití.

Grafické znázornění letových prostorů převzaté z Doplněku X je přiloženo v příloze č.1 i s legendou. V tomto znázornění je zobrazeno v jakých prostorech a výškách se můžeme s určitým letounem pohybovat. Jsou zde rozděleny prostory a výšky pro letouny dle hmotnosti a také v závislosti na potřebě povolení apod..

Tabulka 1 (viz ust. 16)										
ř.	maximální vzletová hmotnost	≤ 0,91 kg		> 0,91 kg a < 7 kg		7 – 25 kg		> 25 kg		bezpilotní letadlo provozované mimo dohled pilota
-	účel použití ----- požadavek	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	
1	evidence letadla	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
2	evidence pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
3	praktický a teoretický test pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
4	povolení k létání	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
5	povolení k provádění LP a LČPVP	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze
6	označení UA: ID štítek / ID štítek + pozn. značka	ne / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ano
7	min. ve vzdálenosti (m): vzlet, přistání / osoby, stavby / osídlený prostor	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150
8	pojištění: běžný provoz / LVV (mil. Kč)	ne / 0,25	dle nař. č. 785/2004 ¹	ne / 1	dle nař. č. 785/2004 ¹	ne / 3 od 20 kg dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹
9	dozor	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ne
10	„failsafe“ systém	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
11	provozní příručka UAS	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne
12	hlášení událostí	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano

Tabulka 6-Povinnosti UAV dle Doplnku X [2]

5. Koncepční návrh bezpilotního systému

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, tak tato kapitola bude věnována návrhu bezpilotního systému pro termografii. Bude zde uveden koncepční návrh takového letounu a návrh řešení vybraných uzlů letounu.

5.1. Úvaha

Pro návrh koncepce letounu je nezbytné stanovit požadavky kladené na letoun. K tomu abychom si tyto požadavky mohli stanovit, tak je nutné vymezit prostor a cíle.

Vymezení prostoru

Fotovoltaické elektrárny se nacházejí v různých prostorech a zřejmě každý si v kontextu s nimi vybaví rozlehlá prostranství zastavěná fotovoltaickými panely. Dnes je čím dál častěji využívají výrobní podniky a také soukromé osoby. Z hlediska jejich kontroly jsou ale panely soukromých osob irelevantní, protože rozloha takových elektráren je omezena většinou pouze na střechu rodinného domu. Naopak u výrobních podniků se může jednat o dost velké plochy střech výrobních hal, nebo již zmíněných rozlehlých prostranství. Takové plochy fotovoltaických panelů je ve většině případů buďto velmi obtížné, nebo dokonce nemožné kontrolovat jinak než pomocí bezpilotního letounu.

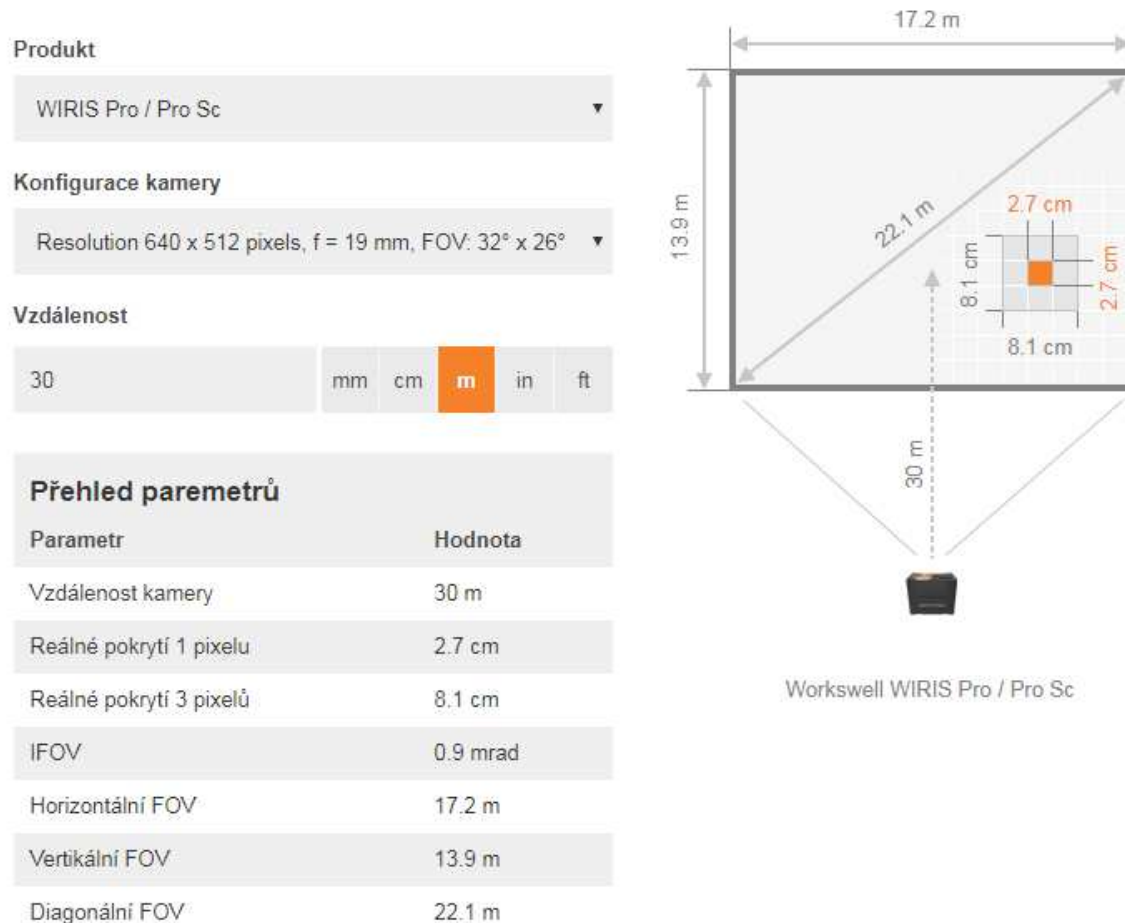
Vzorově si uvedeme FVE o rozměrech 1 000 m x 600 m. Už z hlediska velikosti plochy takové elektrárny by bylo velice problematické zkontrolovat danou plochu obchůzkou. Pro takovou kontrolu je totiž zapotřebí relativně stálých podmínek a takové podmínky by musely vzhledem k velikosti plochy přetrvat možná i několik dní. Pomocí letounu je ale možné danou elektrárnu zkontrolovat i v rámci několika hodin a osobně se poté vrátit pouze k poškozeným panelům na základě GPS lokace dle záznamu. Nicméně je zapotřebí mít dost ostré záznamy pro vyhodnocení nejen již poškozených panelů, ale i počínajících problémů.

Pro kontrolu takové plochy je možno postupovat více způsoby, ale zřejmě nejlepší bude varianta autonomního letu podle předdefinované trasy. K tomu je ale zapotřebí povolení od ÚCL.

Výška a rychlost letu

U těchto parametrů budeme vycházet na základě termokamery. Zvolená termokamera je Workswell WIRIS Pro, jedná se profesionální termokameru určenou pro použití ve spojení s bezpilotním letounem. Tato kamera má rozlišení 640x512 pixelů. Skutečná velikost obrazu

jednoho pixelu je závislá na použité čočce, které mají různé zorné úhly a ohniska. Rozlišení se skutečnou velikostí jednoho pixelu mezi 2-3 cm by mělo být pro danou aplikaci naprosto dostačující. Na obrázku níže můžeme vidět parametry snímané plochy a skutečnou velikost pixelu při použití čočky s ohniskovou vzdáleností $f=19$ mm, ze vzdálenosti 30-ti metrů. Taková výška letu se zdá být ideální a můžeme z ní tedy vycházet.



Obrázek 12 – Zabíraná plocha v závislosti na výšce a použité čočce [31]

Budeme-li uvažovat rychlost letu 35 km/h, která by neměla být problémem z hlediska letounu, ani z hlediska záznamu, můžeme si odvodit, jak dlouho by nám trvalo zkontrolovat danou plochu.

s ... rychlost

a ... šířka FVE

l ... délka FVE

t_a ... čas přeletu na šířku

t_l ... čas přeletu na délku

$$s = \frac{35}{3,6} = 9,7 \text{ m/s}$$

$$t_a = \frac{a}{s} = \frac{600}{9,7} = 61,9 \text{ s}$$

$$t_l = \frac{l}{s} = \frac{1\,000}{9,7} = 103 \text{ s}$$

Uurčíme si počet přeletů vzhledem k šířce zaznamenané plochy 17,2 m.

i_a ...počet přeletů na šířku

i_l ...počet přeletů na délku

$$i_a = \frac{l}{z} = \frac{1\,000}{17,2} \cong 59$$

$$i_l = \frac{a}{z} = \frac{600}{17,2} \cong 35$$

Obě hodnoty jsou zaokrouhleny nahoru, jelikož je nutné vzít v úvahu určitý přesah.

Celková doba kontroly

$$t_{ka} = t_a * i_a = 61,9 * 59 = 3\,652,1 \text{ s} \rightarrow 61,8 \text{ min}$$

$$t_{kl} = t_l * i_l = 103 * 35 = 3\,605 \text{ s} \rightarrow 60,1 \text{ min}$$

Při takové kontrole by byla zapotřebí alespoň jedna výměna baterie, budeme-li uvažovat standardní dobu letu takovýchto letounů v rozmezí 30 – 40 minut. Z toho důvodu by bylo zapotřebí, aby se letoun na základě vybití baterie vrátil nejkratší cestou do výchozího bodu. To je možné nastavit i v autonomním režimu letu, letoun se po výměně baterie může vrátit zpět dle GPS lokace a navázat na předchozí kontrolu.

5.2. Volba koncepce letounu

Budeme zde zvažovat pouze letouny s pohyblivými nosnými plochami z důvodu dobré manévrovatelnosti a možnosti zastavit nad určitým bodem v případě potřeby. Nebylo by vhodné použít koncepci letounu s méně než čtyřmi rotory, kvůli obtížnému ovládní a

nestabilnímu letu. Nejvhodnější a také nejčastěji používané koncepce pro podobné aplikace jsou quad, hexa a octa - koptéry. Čím více rotorů je použito, tím přesnější je ovládání a stabilnější let. S počtem rotorů však narůstá i počet ostatních součástí což s sebou nese i značný nárůst hmotnosti. Je tedy třeba zvolit kompromis mezi těmito vlastnostmi a tudíž se jako nejvhodnější jeví použití hexakoptéry, která zaručuje dost stabilní let s menší hmotností než octakoptéra. Výhodou této volby oproti quadrokoptéře je kromě stabilnějšího letu i možnost bezpečného přistání při selhání jednoho z motorů. Když k takovému selhání dojde u kvadroptéry, tak následuje nekontrolovatelný pád.

5.3. Volba koncepce pohonu

Pro danou aplikaci je nejadekvátnější možností pohonu použití elektromotorů s vrtulemi z důvodu snadného a přesného ovládání. Jako zdroj energie zvolíme baterie, jelikož jsou pro takovou aplikaci dostačující z hlediska doby letu, teoreticky by mělo být možné i hodinové doby letu. Pokusíme se tedy zvolit tu nejlepší možnou variantu motorů a baterií.

5.3.1. Predikce hmotnosti

Pro návrh motorů je zapotřebí znát přibližnou hmotnost letounu včetně všech jeho částí. U odhadu hmotnosti budeme vycházet z obdobných letounů. Jediná hmotnost, která je předem známa je hmotnost zvoleného gimbalu a kamery, všechny ostatní hmotnosti se odvíjí dle zvolených částí, které jsou dimenzovány na předpokládanou hmotnost celku. Odhadovaná hmotnost celku je předpokládána cca. 8 kg na základě obdobných letounů. Z tohoto odhadu je již možné navrhnout potřebné motory, ty by měly mít přibližně dvojnásobný tah při plném výkonu čili poměr 2:1 (tah/hmotnost) a to z důvodu dobré manévrovatelnosti a bezproblémového letu při zhoršených povětrnostních podmínkách. U sportovních aplikací by měl být tento poměr ještě vyšší, naopak u zvolené aplikace není nezbytně nutné tento poměr přesně dodržet. Potřebný tah se vždy rozdělí mezi jednotlivé motory.

5.3.2. Volba motorů

Potřebný tah

T...potřebný tah [g]

T₁...potřebný tah jednoho motoru [g]

m...hmotnost [g]

$$T = 2 * m = 2 * 8\,000 = 16\,000\text{ g}$$

$$T_1 = \frac{T}{6} = \frac{16\,000}{6} \cong 2\,666\text{ g}$$

Níže jsou uvedeny charakteristiky motorů, které by mohly být pro danou aplikaci použity. Charakteristiky jsou převzaty přímo od výrobců v závislosti na použitém napětí a určité vrtuli. Jedná se o nízko-otáčkové motory s velmi dobrým poměrem tahu a příkonu.

Motor	Napětí [V]	Vrtule	„Plyn“ [%]	Proud [A]	Výkon [W]	Tah [g]	Otáčky [ot/min]	Hmotnost [g]
KDE6213XF-185	23,1	18,5*6,3	25	0,7	16	260	1400	415
			37,5	1,5	34	530	1920	
			50	2,6	60	860	2480	
			62,5	4,4	101	1280	3000	
			75	6,7	154	1720	3460	
			87,5	9,7	224	2210	3980	
			100	13,2	304	2880	4440	

Tabulka 7-Motor KDE6213XF-185 [27]

Motor	Napětí [V]	Vrtule	„Plyn“ [%]	Proud [A]	Výkon [W]	Tah [g]	Otáčky [ot/min]	Hmotnost [g]
KDE7208XF-110	23,1	24,5*8,1	25	0,4	9	240	1400	445
			37,5	0,8	18	450	1920	
			50	1,9	43	810	2480	
			62,5	3,1	71	1200	3000	
			75	4,9	113	1640	3460	
			87,5	7,1	164	2110	3980	
			100	9,8	226	2740	4440	

Tabulka 8-Motor KDE7208XF-110 [28]

Motor	Napětí [V]	Vrtule	„Plyn“ [%]	Proud [A]	Výkon [W]	Tah [g]	Otáčky [ot/min]	Hmotnost [g]
U8 KV100	22,2	29*9,5	50	2	44,4	930	1100	240
			65	3,8	84,36	1530	1380	
			75	5,2	115,44	1870	1550	
			85	7,1	157,62	2320	1700	
			100	8,1	179,82	2580	1820	

Tabulka 9-Motor U8 KV100 [29]

Poměr tah/hmotnost

Porovnáme si výsledný tah při použití jednotlivých motorů.

T_{sk} ... maximální skutečný tah

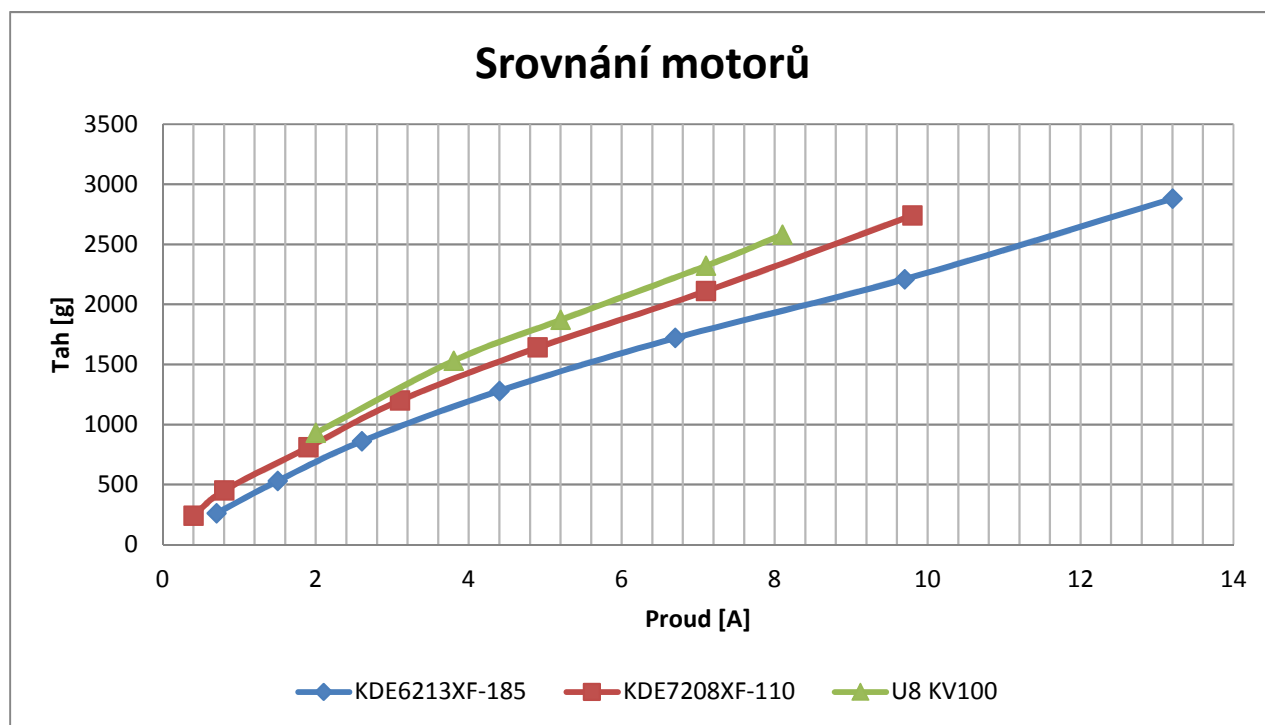
T_{1sk} ... maximální skutečný tah jednoho motoru

$$T_{sk} = 6 * T_{1sk}$$

Motor	Tah T[g]	Poměr T/m
KDE6213XF-185	17280	2.16
KDE7208XF-110	16440	2.055
U8 KV100	15480	1.935

Tabulka 10 – Porovnání tahu motorů

Výsledný poměr je u všech vybraných motorů dostatečný i přesto, že poslední motor nespĺňuje požadavek 2:1. Nicméně jak již bylo zmíněno, tak pro zvolenou aplikaci není tento poměr nezbytný a výsledná hodnota tohoto motoru je naprosto vyhovující. Pro volbu mezi těmito motory bude určující úspornost daného motoru.

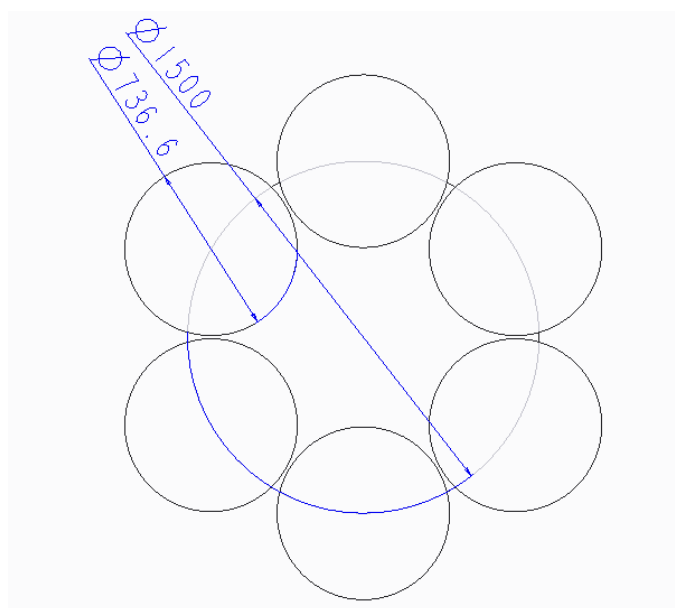


Obrázek – Grafické porovnání motorů Tah/Proud

V grafu můžeme vidět porovnání spotřeby proudu jednotlivých motorů. Vychází z něj jako nejlepší motor U8 KV100, protože jak je zřejmé, tak odebírá nejmenší proud při plném „plynu“ oproti ostatním motorům a navíc má téměř poloviční hmotnost.

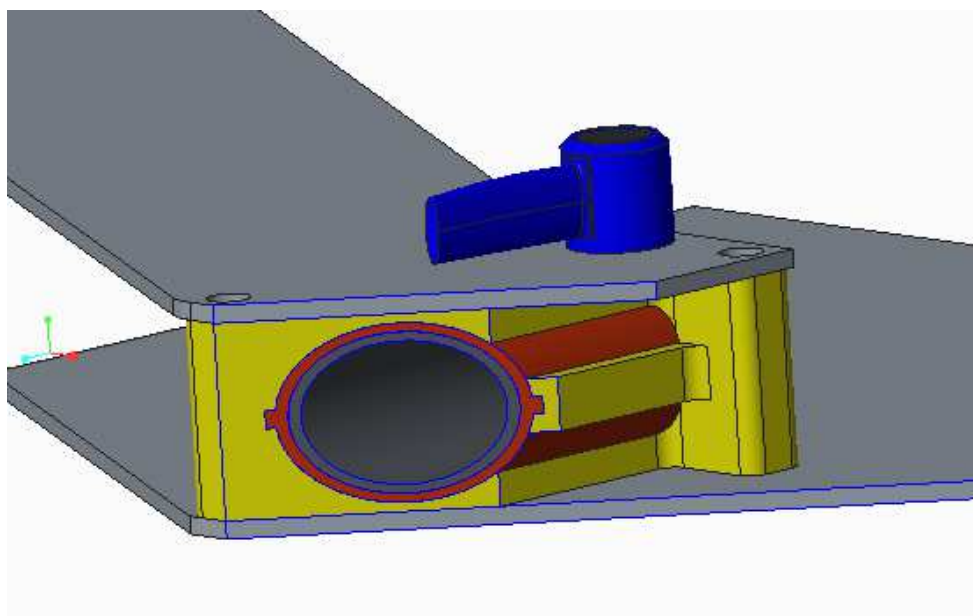
5.3.3. Roztečná kružnice umístění motorů

Vzhledem k vybranému motoru je zapotřebí vzít v potaz velikost použitých vrtulí, které mají délku 736,6 mm, z toho vyplývá minimální potřebná vzdálenost těchto motorů od osy letounu. Hexakoptéra bude mít motory umístěny na roztečné kružnici o velikosti 1 500 mm.

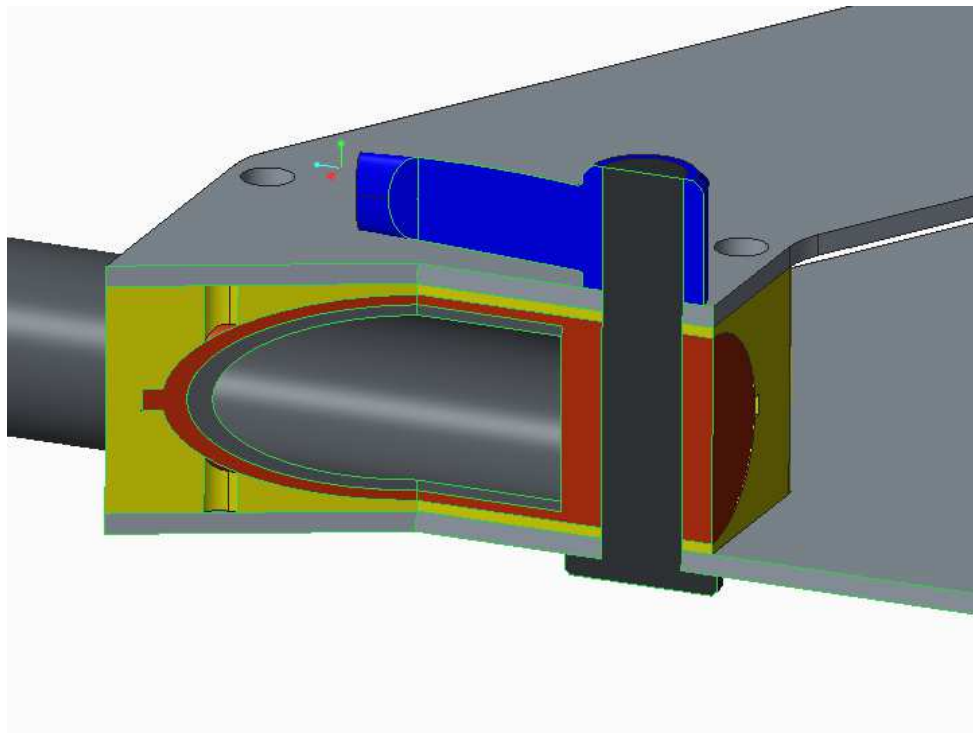


Obrázek – Roztečná kružnice umístění motorů

Na základě takto velkých rozměrů je nutné, aby bylo možné ramena letounu odejmout případně sklopit, pro snadnější manipulaci a převoz. Níže je uveden návrh možného řešení tohoto problému.



Obrázek – Návrh systému upínání ramen



Obrázek – Návrh systému upínání ramen

Žlutý díl spojuje horní a spodní část těla letounu a slouží pro spojení těla s rameny. Červený díl je pevně spojen s jedním koncem ramene z uhlíkového kompozitu a je suvně vložen do žlutého dílu. Pro pevné spojení a zajištění polohy je na konci umístěn lícovaný šroub. Takto by mělo být možné ramena po odpojení konektorů a vyjmutí šroubu relativně rychle a snadno odejmout.

5.3.4. Odhad potřebné kapacity baterie

Jak již bylo zmíněno, tak se pokusíme navrhnout kombinaci motorů a baterií pro dosažení co nejlepšího výsledku. Ze známých hodnot motoru si dopočítáme interpolací minimální potřebný výkon pro stacionární let, a střední hodnotu výkonu.

Minimální potřebný výkon je ten, při kterém všechny motory dodají tah odpovídající hmotnosti letounu.

T_{1min} ... minimální potřebný tah jednoho motoru

m ... hmotnost letounu

$$T_{1min} = \frac{m}{6} = \frac{8\,000}{6} \cong 1333,3\,g$$

Nyní interpolací zjistíme přibližný výkon motoru pro dosažení tahu T_{1min} . Budeme vycházet z hodnot tabulky 9.

Výkon [W] (y)	Tah [g] (x)
44,4	930
84,36	1530

Tabulka 11 – Hodnoty motoru pro interpolaci

$$d_{ymin} = \frac{d_{y2}}{d_{x2}} * d_{x1}$$

$$d_{ymin} = \frac{(84,36 - 44,4)}{(1530 - 930)} * (1333,3 - 930) \cong 26,86 \text{ W}$$

$$y_{min} = d_{y1} + y_1 = 26,86 + 44,4 = 71,26 \text{ W}$$

Pro střední hodnotu výkonu bude zapotřebí také interpolace a to na střední hodnotu tahu mezi tahem minimálním a maximálním, kterou si nyní spočítáme.

$$T_{1stř} = \frac{(T_{1max} - T_{1min})}{2} + T_{1min} = \frac{(2580 - 1333,3)}{2} + 1333,3 = 1956,65 \text{ g}$$

Interpolací zjistíme přibližný výkon motoru pro dosažení tahu $T_{1stř}$. Budeme vycházet z hodnot tabulky 9, zde je uveden i výkon maximální.

Výkon [W] (y)	Tah [g] (x)
115,44	1870
157,62	2320

Tabulka 12 – Hodnoty motoru pro interpolaci

$$d_{ymin} = \frac{d_{y2}}{d_{x2}} * d_{x1}$$

$$d_{ymin} = \frac{(157,62 - 115,44)}{(2320 - 1870)} * (1956,65 - 1870) \cong 8,12 \text{ W}$$

$$y_{stř} = d_{y1} + y_1 = 8,12 + 115,44 = 123,56 \text{ W}$$

$$y_{max} = 179,82 \text{ W}$$

Nyní tedy spočítáme, jaký budou mít motory odběr při středním výkonu.

$$P_{stř} = 6 * y_{stř} = 6 * 123,56 = 741,36 \text{ W}$$

Pokud bychom chtěli dosáhnout doby letu cca hodinu, tak je zapotřebí, aby baterie měla kapacitu minimálně 741,36 Wh. Neuvažujeme odběr ostatních spotřebičů, jako řídicí jednotka, GPS, apod., jelikož největší podíl na odběru energie mají motory. Níže jsou uvedeny hodnoty dvou Li-ion baterií, které by byly použitelné a mají dobrý poměr kapacita/hmotnost. Finální rozhodnutí závisí na celkové hmotnosti letounu.

Baterie	Nominální napětí [V]	Proudová kapacita [Ah]	Vybíjecí proud [A]	Hmotnost [g]	Kapacita [Wh]
6S10P NCR18650GA	22,2	35	100	3000	777
6S12P NCR18650GA	22,2	42	120	3600	932

Tabulka 13 - Použitelné baterie [30]

5.3.5. Skutečná hmotnost letounu

V tabulce níže můžeme vidět hmotnosti použitých prvků kromě rámu a baterie, rám bude zmíněn níže, volba baterie závisí na hmotnosti celku a výsledné době letu.

Prvek	Výrobce	Hmotnost	Počet kusů	Celková hmotnost
Gimbal	Gremsy	700	1	700
Kamera	Workswell	450	1	450
Motor	T-motor	240	6	1440
Vrtule	T-motor	52	6	312
Esc	T-motor	26	6	156
Řídicí jednotka	DJI	386	1	386
Vysílač	Amimon	60	1	60

Tabulka 14 - Hmotnost použitých prvků

Prvky zmíněné v tabulce by měly plně pokrýt veškeré potřeby na řízení letu, navigaci a přenos záznamu z kamery. Výsledná hmotnost těchto prvků činí 3504 g. Další hmotnosti, které musíme započítat, jsou hmotnost rámu, kabeláže, instalačního materiálu a především baterie.

Rám by se měl pohybovat s hmotností okolo 1300 g při použití uhlíkového kompozitu a duralu. Kompletní rám včetně kabeláže a instalačního materiálu by neměl překročit hodnotu 1600 g. Přičteme-li tuto hmotnost k hmotnosti všech prvků, dostáváme se na hodnotu 5104 g

5.4. Výběr baterie

Nyní vybereme baterii na základě výsledné hmotnosti a teoretické doby letu. Máme zde vybrány dvě Li-ion baterie jejichž specifikace jsou zmíněny v tabulce 13.

$$m_1 = 5104 + 3000 = 8104 \text{ g}$$

$$m_2 = 5104 + 3600 = 8704 \text{ g}$$

Na základě těchto finálních hmotností vyhodnotíme použitelnost zvoleného motoru a jaké doby letu jsme schopni dosáhnout.

Z důvodu navýšení hmotnosti oproti odhadu je třeba zjistit potřebný minimální tah jednoho motoru.

$$T_{1sk} = \frac{m_1}{6} = \frac{8104}{6} \cong 1350,7 \text{ g}$$

$$T_{2sk} = \frac{m_2}{6} = \frac{8704}{6} \cong 1450,7 \text{ g}$$

U obou variant je možné použití zvoleného motoru i navzdory navýšení hmotnosti, protože motor má stále dostatečnou výkonovou rezervu. Pro volbu baterie je tedy zapotřebí porovnat jak se navýšení hmotnosti projeví na spotřebě energie a jakých letových časů můžeme teoreticky u obou variant dosáhnout. Pomocí interpolace výpočtu střední hodnoty tahu stejně jako u výpočtu potřebné kapacity baterie dopočítáme hodnoty minimálního a středního odběru, maximální odběr zůstává stejný.

	Tah min [g]	Tah stř [g]	Odběr min [W]	Odběr stř [W]
Varianta 1	1350,7	1965,35	72,42	124,38
Varianta 2	1450,7	2015,35	79,07	129,06

Tabulka 15 – Porovnání variant dle použité baterie

Jak můžeme vidět, tak navýšení odběru energie není nijak zásadní, porovnáme tedy možné dolety na základě kapacity baterie a velikosti odběrů. Pro výpočet časů budeme vycházet z minimálního a středního výkonu všech šesti motorů v porovnání s kapacitou baterie. Při výpočtu z minimálního potřebného odběru se dostaneme k maximálnímu možnému letovému času.

	Varianta 1	Varianta 2
Kapacita [Wh]	777	932
Odběr min. [W]	434,52	474,42
Odběr stř. [W]	746,28	774,36
Odběr max. [W]	1078,2	1078,2
Doba letu max. [min]	107	117
Doba letu stř. [min]	62	72
Doba letu min. [min]	43	51

Tabulka 16 – Teoretická doba letu dle použité baterie

V tabulce můžeme vidět vypočítané hodnoty doletu. Pro vyhodnocení je nejzásadnější doba doletu při středním odběru, která nejlépe vystihuje reálný provoz, jelikož u hodnot s minimálním a maximálním doletem se jedná o extrémní případy. Při výpočtu bylo uvažováno pouze s odběrem motorů.

6. Závěr

Cílem práce bylo uvedení do problematiky bezpilotních systémů a seznámení s technickými prvky, které se zde využívají. Byly zde uvedeny i letouny, které by se daly použít pro zvolenou speciální aplikaci. Touto aplikací je termodiagnostika fotovoltaických elektráren. Následně byla nastíněna pravidla vyplývající z legislativy na základě určitých podmínek.

Cílem praktické části byl koncepční návrh letounu pro zvolenou speciální aplikaci, tedy již zmíněnou termodiagnostiku fotovoltaických elektráren. Volba koncepce letounu se odvíjela od požadavků kladených na danou aplikaci. Tyto požadavky úzce souvisí také s volbou koncepce pohonu. Nejlepší volbou pro splnění požadavků je hexakoptéra poháněna pomocí elektromotorů. Při návrhu pohonu bylo nutné odhadnout hmotnost letounu a na základě této hmotnosti zvolit motory s potřebnými parametry. Byl zvolen nejúspěšnější motor U8 KV100, který je vyhovující i přes reálné navýšení hmotnosti letounu oproti odhadu. Vzhledem k velikosti vrtulí použitých v kombinaci s daným motorem byl uveden návrh možného řešení odjímání ramen. Nakonec bylo nutné určit dobu letu v závislosti na použité baterii a reálné hmotnosti s danou baterií. Nejlépe se ukázalo použití sice těžší, ale kapacitně větší baterie. S touto baterií by mělo být teoreticky možné dosáhnout doby letu blízko k jedné hodině i při napájení všech prvků letounu.

Zdroje

- [1] – The History Of Drones (Drone History Timeline From 1849 To 2019) [online]. [cit. 18.01.2019]. Dostupné z: <https://www.dronethusiast.com/history-of-drones/>
- [2] – Doplněk X leteckého předpisu L2 [online]. [cit. 21.01.2019]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
- [3] - Drone, UAV, UAS, RPA or RPAS - Terminology [online]. [cit. 03.02.2019]. Dostupné z: <https://altigator.com/drone-uav-uas-rpa-or-rpas/>
- [4] – Křídlo [online]. [cit. 19.03.2019]. Dostupné z: <http://www.veda-hrou.cz/cms/46-proc-leti-letadlo.html>
- [5] - Fixed Wing Versus Rotary Wing For UAV Mapping Applications | QuestUAV [online]. [cit. 12.04.2019]. Dostupné z: <https://www.questuav.com/media/case-study/fixed-wing-versus-rotary-wing-for-uav-mapping-applications/>
- [6] - Fixed Wing Drone | Top 6 Rated Fixed Wing RC Drones [2019]. [online]. [cit. 27.04.2019]. Dostupné z: <https://www.dronethusiast.com/fixed-wing-drone-reviews/>
- [7] - Types of Drones [online]. [cit. 23.03.2019]. Dostupné z: <https://filmora.wondershare.com/drones/types-of-drones.html>
- [8] - VELKÝ PRŮVODCE: Základy pro stavbu dronu [online]. [cit. 23.03.2019]. Dostupné z: <https://svetdronu.net/velky-pruvodce-zaklady-pro-stavbu-dronu/>
- [9] - Drone Energy Sources [online]. [cit. 12.03.2019]. Dostupné z: <https://www.droneii.com/drone-energy-sources>
- [10] - Prosadí se Li-S baterie na trhu? V porovnání s rozšířenými Li-ion bateriemi mají řadu výhod [online]. [cit. 14.03.2019]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/lithium-sirove-baterie-vyuziti-biomasy-vyrobu/>
- [11] - Palivové články – princip funkce a dělení [online]. [cit. 16.03.2019]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/palivove-clanky-princip-funkce-a-deleni/>
- [12] - Fotovoltaický článek – Wikipedie [online]. [cit. 16.03.2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8Dl%C3%A1nek

- [13] - Napájení bezpilotních letadel pomocí pozemního laseru [online]. [cit. 15.03.2019].
Dostupné z: <https://www.armadinoviny.cz/napajeni-bezpilotnich-letadel-pomoci-pozemniho-laseru.html>
- [14] - Globální družicový polohový systém – Wikipedie [online]. [cit. 18.01.2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Glob%C3%A1ln%C3%AD_dru%C5%BEicov%C3%BD_polohov%C3%BD_syst%C3%A9m
- [15] - Drone Transmitter and Receiver – Radio Control System Guide - Drone Nodes [online]. [cit. 18.01.2019]. Dostupné z: <http://dronenodes.com/drone-transmitter-receiver-fpv/>
- [16] - Video vysílače - Rotorama Live [online]. [cit. 25.01.2019]. Dostupné z: <http://live.rotorama.cz/tutorial/komponenty/video-vysilace/>
- [17] - Řídicí jednotky - Rotorama Live [online]. [cit. 26.01.2019]. Dostupné z: <http://live.rotorama.cz/tutorial/komponenty/ridici-jednotky/>
- [18] - Aerialtronics: Altura Zenith ATX4 & ATX8 - RC Groups [online]. [cit. 09.02.2019]. Dostupné z: <https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?2122279-Aerialtronics-Altura-Zenith-ATX4-ATX8>
- [19] – DJI Matrice 600 [online]. [cit. 11.05.2019]. Dostupné z: <https://bestdroneforthejob.com/wp-content/uploads/2016/05/DJI-M600-in-flight-arms-retracted.jpeg>
- [20] - Yuneec announces new Tornado H920 Plus and ProAction [online]. [cit. 11.05.2019]. Dostupné z: <https://www.dronerush.com/yuneec-tornado-h920-plus-announced-price-specs-5878/>
- [21] – Tarot T960 [online]. [cit. 11.05.2019]. Dostupné z: <http://www.helipal.com/tarot-t960-hexacopter-frame-set.html>
- [22] – Altura zenith [online]. [cit. 12.05.2019]. Dostupné z: <https://www.aerialtronics.com/en/products/altura-zenith#specifications>
- [23] – DJI Matrice 600 [online]. [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <https://www.dji.com/de/matrice600-pro/info#specs>
- [24] - H920 Specs. *Aerial Drones* | Yuneec USA [online]. [cit. 16.05.2019]. Dostupné z: <https://us.yuneec.com/h920-specs>

[25] -Základní informace, Úřad pro civilní letectví [online]. [cit. 23.02.2019]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/easa/zakladni-informace>

[26] - Letecké předpisy, Úřad pro civilní letectví [online]. [cit. 25.02.2019]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/predpisy/letecke-predpisy>

[27] - Motor KDE6213 XF [online]. [cit. 28.04.2019]. Dostupné z: <https://www.kdedirect.com/collections/uas-multi-rotor-brushless-motors/products/kde6213xf-185>

[28] - Motor KDE7208 XF [online]. [cit. 28.04.2019]. Dostupné z: <https://www.kdedirect.com/collections/uas-multi-rotor-brushless-motors/products/kde7208xf-110>

[29] U8 - U Series - T-MOTOR The Safer Propulsion System [online]. [cit. 22.04.2019]. Dostupné z: http://uav-en.tmotor.com/html/uav/html/2018/u_1106/9.html

[30] Battery pack list – UAV Battery Packs [online]. [cit. 12.05.2019]. Dostupné z: <https://uavfpvbattery.com/battery-pack-inventory/>

[31] Kalkulátor zorného pole kamer a objektivů - Workswell s.r.o. [online]. [cit. 18.05.2019]. Dostupné z: <https://workswell.cz/kalkulator-objektivu-vypocet-zorneho-pole/>

Tabulky

Tabulka 1 - Dělení dle použití

Tabulka 2 - Výhody a nevýhody modifikací [8]

Tabulka 3 - Globální navigační systémy [14]

Tabulka 4 - Regionální navigační systémy [16]

Tabulka 5 – Porovnání prodávaných letounů

Tabulka 6 -Povinnosti UAV dle Doplnku X [2]

Tabulka 7 -Motor KDE6213XF-185 [27]

Tabulka 8 -Motor KDE7208XF-110 [28]

Tabulka 9 -Motor U8 KV100 [29]

Tabulka 10 – Porovnání tahu motorů

Tabulka 11 – Hodnoty motoru pro interpolaci

Tabulka 12 – Hodnoty motoru pro interpolaci

Tabulka 13 - Použitelné baterie [30]

Tabulka 14 - Hmotnost použitých prvků

Tabulka 15 – Porovnání variant dle použité baterie

Tabulka 16 – Teoretická doba letu dle použité baterie

Obrázky

Obrázek 1 – Tah křídla[4]

Obrázek 2 – Fixed wing letoun [6]

Obrázek 3 – Modifikace vícerotorových letounů [7]

Obrázek 4- Dělení dle doplňku X [2]

Obrázek 5 – Schéma pohonu při použití baterií

Obrázek 6 – Schéma pohonu při použití spalovacího motoru

Obrázek 7 – Schéma pohonu při použití palivových článků

Obrázek 8 – Altura Zenith ATX8

Obrázek 9 – DJI Matrice 600 Pro

Obrázek 10 – Yuneec Tornado H920 Plus

Obrázek 11 – Tarot T960

Obrázek 12 – Zabíraná plocha v závislosti na výšce a použité čočce

Obrázek 13 – Grafické porovnání motorů Tah/Proud

Obrázek 14 – Roztečná kružnice umístění motorů

Obrázek 15 – Návrh systému upínání ramen

Obrázek 16 – Návrh systému upínání ramen

Obrázek 17 – Legenda k obrázku 18 a 19 [2]

Obrázek 18 – Grafické znázornění letových prostorů [2]

Obrázek 19 – Grafické znázornění letových prostorů [2]

Příloha č.1

Grafické znázornění letových prostorů včetně legendy

Legenda k obrázkům 1 a 2:

Modely letadel s maximální vzletovou hmotností do 25 kg

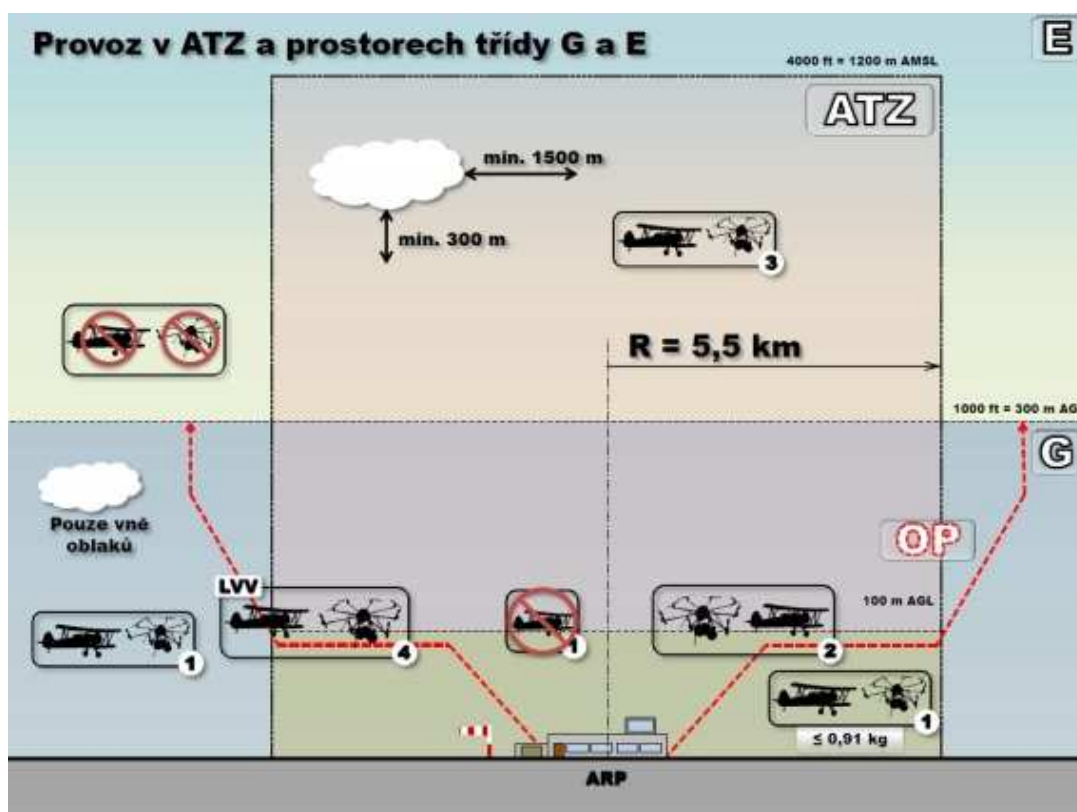


Bezpilotní letadla (tj. včetně modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nad 25 kg)

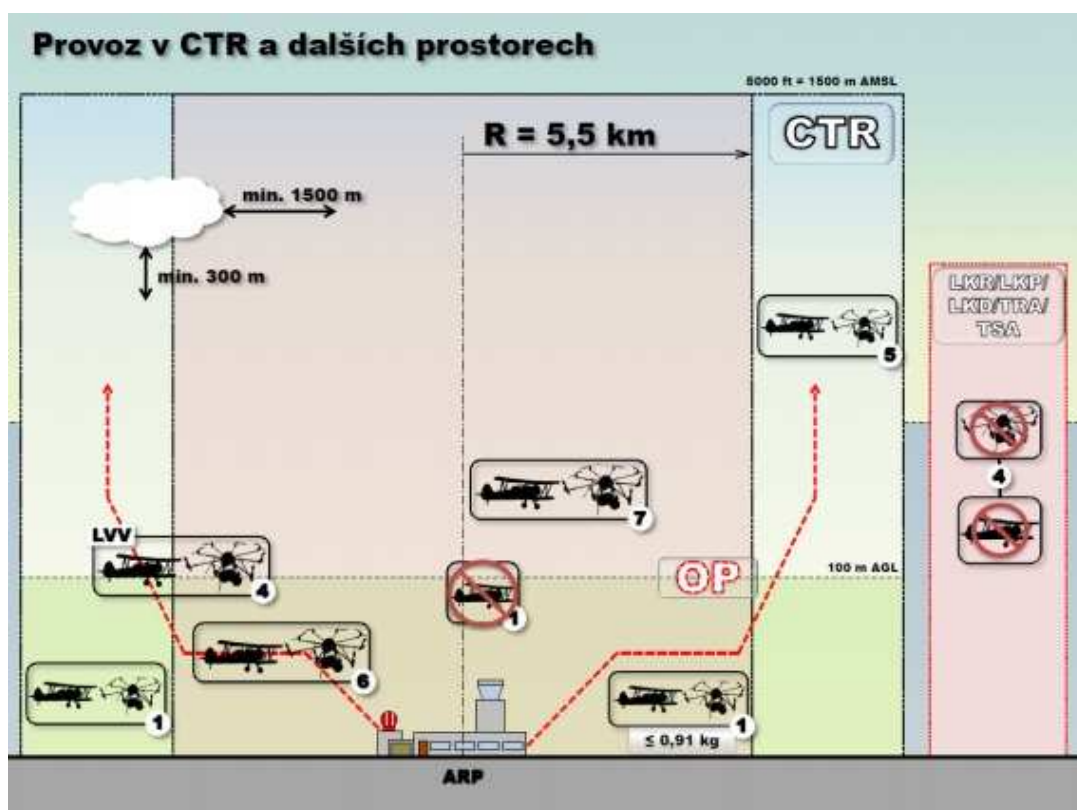
CTR	Řízený okresek letiště	LKR	Omezený prostor
ATZ	Letištní provozní zóna neřízeného letiště	LKP	Zakázaný prostor
OP	Ochranná pásma letišť	LKD	Nebezpečný prostor
G / E	Označení třídy vzdušného prostoru	TSA	Dočasně vyhrazený prostor
ARP	Vztažný bod letiště	TRA	Dočasně vymezený prostor
AMSL	Nadmořská výška	AGL	Nad úrovní země

- 1 Lety bez koordinace
- 2 Splnění podmínek provozovatele letiště (PL) + koordinace s letištní informační službou (AFIS)
- 3 Splnění podmínek PL + koordinace s AFIS
- 4 Souhlas/povolení ÚCL
- 5 Letové povolení příslušného stanoviště řízení letového provozu (ŘLP). ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru
- 6 Povolení ÚCL (nebo v případě leteckých prací (LP) koordinace s ŘLP + koordinace s PL). ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru
- 7 Povolení ÚCL (nebo v případě LP koordinace s ŘLP + koordinace s PL) + letové povolení ŘLP. ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru

Obrázek 17 – Legenda k obrázkům 18 a 19 [2]



Obrázek 18 – Grafické znázornění letových prostorů [2]



Obrázek 19 – Grafické znázornění letových prostorů [2]