

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Stanislav Absolon

**MALÉ DÁLKOVĚ OVLÁDANÉ BEZPILOTNÍ LETADLO
PRO VÝZKUMNÉ A KOMERČNÍ VYUŽITÍ**

Diplomová práce

2015



K621..... Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Stanislav Absolon

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Malé dálkově ovládané bezpilotní letadlo
pro výzkumné a komerční využití**

Název tématu (anglicky): Small Remotely Operated Aerial System Scientific
and Commercial Use

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Úvod
- Seznámení s problematikou používání bezpilotních modelů a malých bezpilotních letounů
- Technické parametry, výběr vhodného typu a konstrukce
- Možnosti využití pro výzkumné projekty
- Podmínky certifikace pro bezpilotní modely a malé bezpilotní letouny
- Zhodnocení
- Závěr

Rozsah grafických prací: minimálně 5 stran

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: WEIHUA ZHAO, TIAUW HIONG GO. Quadcopter formation flight control combining MPC and robust feedback linearization.

BERNARD TAT MENG LEONG. SEW MING LOW, MELANIE PO-LEEN OOI. Low-Cost Microcontroller-based Hover Control Design of a Quadcopter.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Peter Vittek

Ing. Tomáš Duša

Datum zadání diplomové práce:

30. července 2014

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce:

31. května 2015

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
- b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



doc. Ing. Daniel Hanus, CSc.

vedoucí

Ústavu letecké dopravy



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek

děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Stanislav Absolon

jméno a podpis studenta

V Praze dne.....30. července 2014

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování vedoucímu diplomové práce, panu ing. Peterovi Vittekovi za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé bakalářské práce.

Rovněž bych chtěl poděkovat všem konzultantům za vstřícnost a pomoc při získání potřebných informací a podkladů.

.....

Podpis

Čestné prohlášení

Nemám závažný důvod proti užívání 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).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 27. května 2015

.....

Podpis

Autor: Bc. Stanislav Absolon

Název práce: Malé dálkově ovládané bezpilotní letadlo pro výzkumné a komerční využití

Škola: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní

Vydání: Praha 2015

KLÍČOVÁ SLOVA

UAV, Bepilotní letadlo, Bepilotní prostředek, Model letadla, Multikoptéra, Kvadroptéra

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na návrh bezpilotního prostředku, jeho využití v letectví při biologické ochraně letiště a zabezpečení perimetru letiště a v zemědělství. Prototyp bezpilotního prostředku, kvadroptéry, je primárně navržen pro pořizování záznamového materiálu. Úvodní část práce obsahuje použité názvosloví a definice, zařazení mezi bezpilotní prostředky a popis součástí bezpilotního prostředku, používaných pro řízení letu. V následující kapitole je uveden postup návrhu a vlastní konstrukce kvadroptéry a popis použitých systémů pro řízení letu a pro pořizování záznamového materiálu. Dále jsou zde uvedeny příklady použití navrženého zařízení v letectví a v zemědělství. Součástí práce je naznačený postup k splnění nutných podmínek k získání patřičné certifikace pro provoz v České republice. Postup certifikace a pravidla provozování jsou porovnány s certifikačními postupy a pravidly v evropských i mimoevropských zemích.

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKACE

ABSOLON, Stanislav. *Malé dálkově ovládané bezpilotní letadlo pro výzkumné a komerční využití*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze Fakulta Dopravní. Vedoucí práce Ing. Peter Vittek, Ing. Tomáš Duša.

Autor: Bc. Stanislav Absolon

Title: Small Remotely Operated Aerial System Scientific and Commercial use

University: Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences

Publication: Prague 2015

KEYWORDS

UAV, Unmanned aircraft, Unmanned vehicle, Model aircraft, Multicopter, Quadcopter

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on a study and design of an unmanned aerial vehicle – Quadcopter. It deals with its possible employment in aviation, particularly in a biological protection of an airport and security of an airport perimeter, and in agriculture. The prototype of the Quadcopter is primarily based on monitoring. The introductory part of the thesis covers terminology and definitions, classification into unmanned vehicles and description of components used for a flight control. The next section involves the actual process of designing and construction of the Quadcopter, followed by a description of systems used for the flight control and recording. Examples of potential use in aviation and agriculture are stated here as well. This study suggests a procedure essential for awarding an appropriate certificate to enable a flight operation in the Czech Republic. Certification process, permissions and regulations in the Czech Republic are compared with those in European and non-European countries.

BIBLIOGRAPHIC IDENTIFICATION

ABSOLON, Stanislav. *Small Remotely Operated Aerial System Scientific and Commercial use*. Praha, 2015. Diploma thesis. Czech technical university in Prague Faculty of Transportation sciences. Supervisor Ing. Peter Vittek, Ing. Tomáš Duša.

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů	9
1. Úvod	13
2. Seznámení s problematikou používání malých bezpilotních letadel	15
2.1 Definice potřebné pro popis bezpilotních zařízení	15
2.2 Rozčlenění bezpilotních zařízení	16
2.2.1 Způsob využití bezpilotních zařízení	17
2.3 Terminologie popisu bezpilotního prostředku	18
2.3.1 Popis pohybů dle souřadného systému	20
2.4 Popis jednotlivých částí multikoptér	22
2.4.1 Pohonné jednotky	22
2.4.2 Li-Pol akumulátory	24
2.4.3 Řídicí systém stabilizace pro multikoptéry	25
2.4.4 Stabilizační systém pro záznamová zařízení	26
3. Technické parametry, výběr vhodného typu a konstrukce	28
3.1 Konstrukce rámu prototypu	28
3.2 Jednotka autopilota	29
3.2.1 PID řízení autopilota	30
3.2.2 Rozmístění výstupů autopilota Pixhawk	31
3.2.3 Družicová navigace	34
3.2.4 Datový spoj a použitý software pro komunikaci s autopilotem	34
3.2.5 Přijímač a vysílač	37
3.2.6 Pohonná jednotka kvadrokoptéry	37
3.2.7 Použité Li-Pol akumulátory	38
3.2.8 Výroba rámu	39
3.2.9 Gimbal	42
3.2.10 Záznamové zařízení	43

3.2.11	Osvětlení kvadrokoptéry.....	44
3.2.12	Testovací let kvadrokoptéry	44
4.	Možnosti využití pro výzkumné projekty	45
4.1	Biologická ochrana a monitorování perimetru letišť	45
4.1.1	Biologická ochrana letišť pomocí bezpilotního zařízení.....	45
4.2	Ochrana perimetru letiště.....	50
4.3	Využití bezpilotních prostředků v zemědělství	53
5.	Podmínky certifikace pro malá bezpilotní letadla	55
5.1	Legislativní dokumenty platné pro provoz bezpilotních letadel v ČR	55
5.2	Postup certifikace pro navržené bezpilotní letadlo	56
5.2.1	Získání povolení k létání (nutné pro provoz letadla za úplatu).....	57
5.2.2	získání povolení pro provoz za úplatu.....	60
5.3	Certifikace bezpilotního letadla pro sportovní a rekreační účely	61
5.4	Letecká veřejná vystoupení	61
5.5	Prostor vyhrazený pro provoz bezpilotních letadel a modelů letadel	62
5.5.1	Legenda k Obrázkům 1 a 2 [34]:.....	66
5.6	Legislativní rozdíly provozu bezpilotních letadel v evropských a mimoevropských zemí.....	66
5.6.1	Legislativní požadavky vybraných evropských států.....	66
5.6.2	Legislativní požadavky pro provoz bezpilotních letadel v Austrálii a USA	68
5.7	Šetření leteckých nehod a incidentů	70
5.7.1	Zvýšení bezpečnosti pasivními prvky	71
6.	Zhodnocení	72
7.	Závěr	74
	Použité zdroje	76
	Seznam příloh.....	81

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Popis
3D	3 Dimension
ACC	Accelerometer
ACT	Activity
AFIS	Aerodrome Flight Information Service
AGL	Nad úrovní země
AMSL	Nadmožská výška
ARP	Vztažný bod letiště
ATC	Air Traffic Control
ATZ	Letištní provozní zóna neřízeného letiště
AUX	Auxiliary
AV	Audio Video
BEC	Battery Eliminator Circuit
BLDC	Brush Less Direct Current
BVLOS	Beyond Visual Line Of Sight
CAA	Civil Aviation Authority
CASA	Civil Aviation Safety Authority
CCW	Counter Clockwise
CNC	Computer Numerical Control
COA	Certificate of Waiver or Authorization
CPU	Central Processing Unit
CTR	Control Zone
CTR	Řízený okrsek letiště
CW	Clockwise
ČR	Česká republika
ČSN	Česká státní norma
EASA	European Aviation Safety Agency
ESC	Electronic Speed Control
EU	European Union
EVLOS	Extended Visual Line Of Sight
FAA	Federal Aviation Administration
FMU	Flight Management Unit

FPV	First Person View
G/E	Označení třídy vzdušného prostoru
GND	Ground
GPS	Global Positioning System
GRS	Galaxy Rescue System
GS	Ground Speed
HUD	Head Up Display
IAS	Indicate Air Speed
ICAO	International Civil Aviation Organization
IO	Input/Output
LBA	Luftfahrt-Bundesamt
LČPVP	Letecká činnost pro vlastní potřebu
LED	Light Emitting Diode
Li-Pol	Lithium Polimer
LKD	Nebezpečný prostor
LKP	Zakázaný prostor
LKR	Omezený prostor
LP	Letecké práce
LVV	Letecká veřejná vystoupení
MAAA	Model Aeronautical Association of Australia
Mag	Magnetometer
MCTR	Military Control Zone
MEMS	Microelectromechanical System
MPU	MicroProcessor Unit
NiCd	Nikl-Kadmium
NTSC	National Television System Committee
OP	Ochranná pásma letišť
PAL	Phase Alternating Line
PID	Proportional Integral Derivative
PL	Provozovatel letiště
PPM	Pulse Position Modulation
PWR	Power
QFE	Q-kód pro tlak vzduchu
RC	Remote Control

RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RPS	Remote Pilot Station
RTL	Return To Launch
ŘLP	Řízení letového provozu
SBUS	Serial Bus
SD	Secure Digital
SPKT/DSM	Spektrum Directory Service Migration
SUA	Small Unmanned Aircraft
TRA	Dočasně vymezený prostor
TSA	Dočasně vyhrazený prostor
UA	Unmanned Aircraft
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aircraft Vehicle
USA	Spojené státy americké
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
USB	Universal Serial Bus
UTC	Universal Coordinated Time
VCC	Virtual Channel Connection
VLOS	Visual Line Of Sight
VPD	Vzletová a přistávací dráha

Symbol	Jednotka	Popis
v_m	[V]	Elektrické napětí
C	[mAh]	Kapacita
m	[g]	Hmotnost
v	[m/s]	Rychlost
F	[N]	Síla
a	[m/s ²]	Zrychlení
$F_{CORIOLIS}$	[N]	Síla
v_x	[m/s]	Rychlost v ose x
F_x	[N]	Síla v ose x
t	[s]	Čas
v_{0x}	[m/s]	Rychlost v ose x
x_0	[m]	Vzdálenost v ose x
Ω_0	[1/s]	Otáčky

1. Úvod

Letecká doprava, nejmladší z druhů dopravy, zaznamenala za svou více než stoletou historií velký rozmach. Stala se vzorem pro vznik dalších leteckých, ale i neleteckých odvětví. Jedním z nich je i letecké modelářství, původně tvořené skupinami zájemců, které spojovalo nadšení z poznávání letecké dopravy. Předmětem zájmu modelářů bylo vytváření zmenšených kopií letadel, které byly pro ně finančně dostupnější, stejně tak jako jejich provozování. Během krátké doby se letecké modelářství stalo velmi populární. Každý modelář se vlastně zapojil do procesu zdokonalování tohoto odvětví svými nově nabitými zkušenostmi s provozem leteckých modelů. Především velmi rychlý technický rozvoj způsobil, že se letecké modelářství stalo samostatnou a rovnocennou složkou letecké dopravy.

Začal jsem se zabývat myšlenkou spojit dvě poměrně odlišná odvětví leteckého provozu a najít tak řešení otázky, jak zvýšit bezpečnost leteckého provozu využitím modelů letadel. V dnešní době nastává situace, že sofistikovanost řídicích systémů modelů letadel je na tak vysoké úrovni, že lze jejich služeb využít v letecké dopravě i v jiném průmyslu.

Ve své diplomové práci jsem postupoval následovně. V úvodu jsem nejprve definoval používanou terminologii, nutnou k technickému popisu multikoptér a k popisu jejich orientace v prostoru. Jednotlivé komponenty, použité ke stavbě kvadrokoptéry, jsou běžně používány i při stavbě ostatních leteckých modelů. Dále je zde uveden legislativní pohled na bezpilotní prostředky za strany Evropské agentury pro bezpečnost EASA a Organizace civilního letectví ICAO v porovnání s legislativním pohledem Úřadu pro civilní letectví ÚCL. Další kapitola je věnována vlastnímu návrhu kvadrokoptéry, která slouží k pořizování záznamového materiálu. Jsou zde popsány veškeré použité komponenty. Předchozí zkušenosti se stavbou modelů letadel mi umožnily navrhnout, sestavit a ověřit při letových zkouškách projektované zařízení. Mé zkušenosti s řízením multikoptér však byly pouze teoretické. Rozhodl jsem se proto nejprve sestavit prototypovou, zkušební kvadrokoptéru, kterou jsem se naučil pilotovat. Poté jsem zkonstruoval kvadrokoptéru z kompozitních materiálů, nesoucí na palubě záznamové zařízení v podobě malé kamery.

Následující kapitola se zabývá i jiným použitím navržené kvadrokoptéry než pro pořizování záznamového materiálu. Jedním z návrhů je využití k biologické ochraně letišť. Umístěním plašícího zařízení na kvadrokoptéru se dá docílit účinného odehnání ptactva z blízkosti leteckého provozu a tím tak zvýšit jeho bezpečnost. Tento druh ochrany může doplnit stávající zabezpečení biologické ochrany letišť, sokolnictví. Druhým návrhem, jak použít

kvadrokoptéru v letecké dopravě, je zajišťování úrovně zabezpečení perimetru letiště. Je zde uveden postup, jakým způsobem je třeba modifikovat kvadrokoptéru pro navržené účely použití. Obdobně lze zařízení využít i v zemědělství, např. k plašení škůdců a monitorování zemědělských ploch.

V páté kapitole je naznačen postup certifikování navržené kvadrokoptéry pro použití k leteckým pracím a k letecké práci pro vlastní potřebu. Legislativní požadavky certifikace jsou porovnány s požadavky pro provoz modelů letadel s maximální vzletovou hmotností přesahující 20 kg (bezpilotní letadla). Z důvodu značné různorodosti v certifikačních procesech je provedeno porovnání národních certifikačních požadavků s požadavky evropských i mimoevropských zemí.

Šestá kapitola se zabývá zhodnocení práce a ekonomickým aspektem vytvoření vlastní konstrukce kvadrokoptéry a její certifikace.

Provoz bezpilotních prostředků není fenoménem současné doby. První pokusy o dálkové řízení proběhly ještě dříve než start prvního letadla bratrů Wrightových. Průnik na celosvětový trh byl zaznamenán až v posledních letech. Milníkem ve vývoji byl rok 2013, který také bývá nazýván jako „rok dronů“. Rychlý rozvoj robotiky je z velké části zaměřen na oblast letectví.

Tato diplomová práce je zaměřená právě na oblasti, ve kterých bezpilotní prostředky nacházejí nebo by mohly nalézt velké uplatnění. Mezi nejběžnější využití patří monitorování přírodních zdrojů, atmosférický výzkum, monitoring energetického vedení, monitorování volně žijících zvířat, aj. Bepilotní prostředky je třeba implementovat do stávajícího leteckého provozu tak, aby byla zachována bezpečnost letového provozu. Regulace však musí být nastavena takovým způsobem, aby nedocházelo ke stagnaci, nebo dokonce k úpadku rozvoje bezpilotních prostředků.

2. Seznámení s problematikou používání malých bezpilotních letadel

Rozvoj civilních bezpilotních systémů v poslední době zaznamenal velký, především technický skok dopředu. Tyto systémy zahrnují velkou škálu zařízení a technologií, které se neustále vyvíjí. To vytváří úplně nový obor leteckého průmyslu, ale také novou oblast na trhu služeb. Takto rychlý a masivní růst působí v celosvětovém měřítku dopad na mnoho dalších, nejen leteckých odvětví.

V neposlední řadě prudký rozvoj způsobil, že legislativa pro provoz bezpilotních systémů značně zaostává za technickým pokrokem. Jedná se o problém v celosvětovém měřítku. V současné době existuje velké množství způsobů legislativního hodnocení. Položíme-li si otázku, které hodnocení je správné, narazíme na velký problém. Technický vývoj postupuje neustále dopředu velkou rychlostí, proto v současné době nelze dost dobře předpovědět, jakým směrem se bude ubírat. V tomto případě bude vždy legislativa o malý krok pozadu a to až do doby, kdy dojde k zpomalení, či ustálení technického pokroku.

Pro seznamování se s problematikou bezpilotních letadel je nejprve nutné přesně definovat správné názvosloví.

2.1 Definice potřebné pro popis bezpilotních zařízení

K správnému popisu bezpilotních zařízení je třeba nejprve stanovit jejich definice, abychom se později vyvarovali záměny některých z těchto pojmů. Kompletní názvosloví lze nalézt v předpise L2 doplněk X a české státní normě pod označením ČSN 31 001.

***Autonomní letadlo** - Bepilotní letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu. [1]*

***Bepilotní letadlo (UA)** - Letadlo určené k provozu bez pilota na palubě [1]*

***Bepilotní prostředek (UAV)** – Letadlo způsobilé létat bez pilota, které je za letu řízené automatickým zařízením nebo dálkově ze země [3]*

***Bepilotní systém (UAS)** - systém skládající se z bepilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení*

a zařízení pro vypuštění a návrat. Bezpilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více [1]

Dálkově řízené letadlo (RPA) - bezpilotní letadlo, které pilot může řídit dálkově [2]

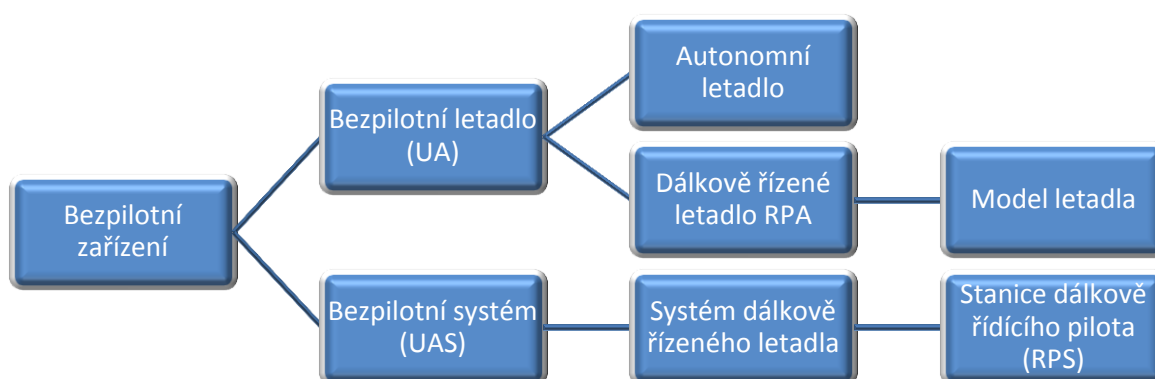
Dron – velmi často bývají bezpilotní letadla spojována s tímto výrazem, jde o převzaté slovo z anglického jazyka. Anglický výraz „drone“ je v překladu trubec. Česká legislativa tento termín neobsahuje a jeho používání je nesprávné.

Model letadla - letadlo, které není schopné nést člověka na palubě, je používané 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 [1]

Systém dálkově řízeného letadla (RPAS) - Viz definice UAS, pokud letadlem je RPA [2]

2.2 Rozčlenění bezpilotních zařízení

Rozdělení bezpilotních zařízení lze provést dvěma způsoby. Prvním uvedeným způsobem je rozdělení navržené Úřadem civilního letectví a Ministerstvem dopravy v národní sféře České republiky. Dle tohoto rozdělení můžeme model letadla považovat za bezpilotní letadlo a Chicagská úmluva sestavená radou ICAO se na tyto letadla vztahuje.



Názor rady ICAO se značně liší od názoru ÚCL a Ministerstva dopravy. Rada ICAO uvedla v oběžníku č. 328, že model letadla není letadlo, tudíž se na něj nemůže vztahovat Chicagská úmluva. Rozdíl mezi modelem a UA je příliš velký, aby se na obě kategorie pohlíželo jen jako na jeden subjekt. Z tohoto důvodu ICAO ponechává regulaci modelů na národní úrovni.

Tento názor také podpořila Evropská agentura pro bezpečnost v letectví EASA, která dále rozhodla, že regulaci modelů letadel ponechá rovněž na národní úrovni. Každý stát tedy vytváří vlastní legislativu a reguluje provoz těchto zařízení podle svého uvážení a zkušeností. Z pohledu provozovatelů nelze v tuto chvíli jasně říci, zda rozhodnutí, které preferuje ÚCL a Ministerstvo dopravy, je správné.

2.2.1 Způsob využití bezpilotních zařízení

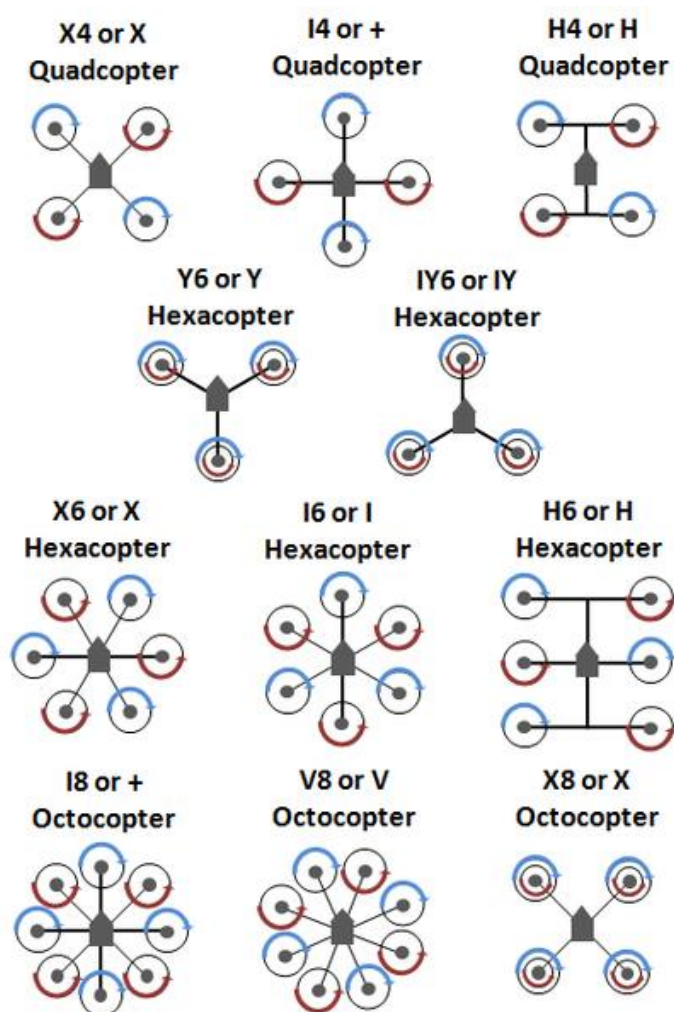
V předchozí kapitole je uvedeno rozdělení bezpilotních zařízení podle legislativních požadavků. V této kapitole je uvedeno, jak lze provozovat bezpilotní prostředky k soukromému nebo komerčnímu využití.

První, a zároveň nejméně náročnou kategorií, řídící se legislativními požadavky, je **model letadla**. Model smí být provozován pouze ke sportovním a rekreačním účelům. Modely mohou být dálkově řízené, nebo neřízené (volné modely) a mohou být vybaveny autopilotem. Na palubě modelu nesmí být žádný systém, který by umožňoval vedení modelu na určité místo. Za systém automatického vedení letadla se považují i systémy AUTO (popsány v kapitole 3.2). Maximální vzletová hmotnost těchto modelů je omezená hodnotou 20 kg. Modely letadel, splňující tuto podmínku, musí být provozovány v souladu s leteckým předpisem, ale nevztahuje se na ně nutnost projít certifikačním procesem.

Bezpilotní letadlo – způsob provozu je totožný s modelem letadla, tedy pro sportovní a rekreační účely, ale navíc může být provozováno za úplatu. Provozem za úplatu je z hlediska legislativy vykonávání leteckých prací, nebo leteckých aktivit pro vlastní potřebu. *Letecké práce* (LP) je činnost spojená s využíváním letadla pro pracovní činnosti za účelem zisku (např. snímkování, výuka v leteckých školách apod.). *Letecké činnost pro vlastní potřebu* (LČPVP) je činnost, která neslouží ke komerčnímu užití za úplatu, ale jedná se o použití k vlastní podnikatelské činnosti.

2.3 Terminologie popisu bezpilotního prostředku

Tato práce je zaměřená na tzv. „multikoptéry“, neboli letadla, která vyvozují vztlak jiným způsobem, než aerodynamickou silou na nosných plochách. Pojem „multikoptéra“ je odvozen od počtu motorů potřebných k letu. Minimální počet jsou tři pro trikoptéru, multikoptéra se čtyřmi motory je kvadrokoptéra, atd. Na *Obrázku 1* je znázorněné označování multikoptér dle rozmístění pohonných jednotek.



Obrázek 1: Názvosloví multikoptér dle rozmístění pohonných jednotek [4]

Chceme-li zařadit multikoptéry do kategorie, kterou udává česká státní norma zabývající se leteckým názvoslovím (ČSN 31 001), nalezneme tuto definici letadla:

Letadlo – zařízení schopné vyvozovat síly nesoucí jej v atmosféře z reakcí vzduchu, které nejsou reakcemi vůči zemskému povrchu [3]

Tento popis letadla je naprosto dostačující a lze tedy multikoptéru zařadit mezi letadla. Problém nastává, zda hodnotit multikoptéru jako letoun, nebo jako vrtulník. Česká státní norma uvádí tento popis pro obě kategorie:

Letoun – motorové letadlo těžší než vzduch, u něhož je vztlak potřebný k letu vyvozován aerodynamickými silami na nosných plochách, které jsou v dané konfiguraci vůči letadlu nepohyblivé. [3]

Vrtulník (helikoptéra) – motorové rotorové letadlo, jehož nosný prostor (nosné rotory) s přibližně svislou osou otáčení je za letu poháněn motorem a tah potřebný k horizontálnímu letu je vyvozován složkou aerodynamické síly na nosném rotoru (nosných rotorech). [3]

Popis multikoptéry se nejvíce přibližuje popisu vrtulníku (helikoptéry), ale narážíme zde na problém, pokud chceme hovořit o rotorovém pohonu multikoptéry. Rotor je definován jako rotující nosná plocha, která vyvozuje tah změnou úhlů nastavení rotorových listů a není součástí pohonné jednotky. Rotor patří do kategorie rotujících nosných ploch.

Nosný rotor – soustava otáčejících se nosných ploch (listů) vyvozujících vztlakové a řídicí síly [3]

Multikoptéry jsou řízeny pouze změnou otáček motorů. Vrtule jsou pevně spojeny s motory a nelze je považovat za rotující nosné plochy, jsou součástí pohonné jednotky (skládá se z: motoru, vrtule a regulátoru). V tomto případě multikoptéry nemůžeme řadit mezi vrtulníky. Je zde jistá shoda způsobu letu (např. visení, klonění, apod.), jedná se ale pouze o podobnost pohybů. Jako definici vrtule česká státní norma uvádí:

Vrtule - je lopatkový stroj poháněný motorem určený k vyvozování síly, která působí přibližně ve směru rychlosti letu.[3]

Pro srovnání je zde uvedeno i názvosloví vrtule ve znění slovenské normy, kterou hodnotím jako vhodnější:

Vrtule - je lopatkový stroj, který mění mechanickou energii motoru na kinetickou energii s cílem vyvinout sílu potřebnou na pohyb letadla. [42]

Další možný popis multikoptéry je letadlo se zdvihovými motory a bezkřídle letadlo. To je popsáno následovně:

Letadlo se zdvihovými motory – proměnné letadlo, které pro vzlet a přistání využívá pouze k tomu účelu instalované motory, jejichž tahem vzniká vztlak. [3]

Bezkrídle letadlo – letadlo těžší než vzduch, u něhož je vztlak potřebný k letu vyvozován jiným způsobem než aerodynamickými silami na nosných plochách. [3]

Z výše uvedených důvodů považuji za nejvhodnější označit multikoptéry, jako bezkrídle letadlo. Pokud bude potřebné vytvořit nové názvosloví, které by tento specifický druh letadla správně popsalo, můžeme je formulovat např. takto:

Multikoptéra – motorové, vrtulové letadlo s přibližně svislou osou rotace nosných motorů. Aerodynamická síla je vyvozována na nosných vrtulových listech. Pohyb letadla je realizován změnou otáček nosných motorů.

Takto formulované názvosloví dostatečně vyjadřuje charakter multikoptéry.

2.3.1 Popis pohybů dle souřadného systému

Pohyb objektu v třírozměrném prostoru vyžaduje přiřazení třech hlavních os (X, Y a Z), pro každý směr a třech rotačních pohybů okolo hlavních os. Popis hlavních směrů souřadnicového systému je znázorněn na *Obrázku 2*.



Obrázek 2: Zavedený souřadný systém

Dopředný pohyb je realizován ve směru podélné osy X (na *Obrázku 2* je znázorněn červenou barvou). Rotace okolo této osy v kladném směru je zobrazena šipkou téže barvy a nazýváme jej klonění (často používaný anglický výraz ROLL). Osa znázorněná zelenou barvou pak značí příčnou osu Y a rotaci kolem této osy nazýváme klopení (anglicky výraz PITCH). Osa Z je znázorněna modrou barvou a rotace kolem této osy se nazývá zatačení (anglický výraz YAW).

Orientace v prostoru je realizována změnou otáček motorů. Na *Obrázku 3* jsou znázorněny směry rotací jednotlivých motorů na příkladu kvadrokoptéry.



Obrázek 3: Směry rotací motorů na příkladu kvadrokoptéry

Veškeré pohyby multikoptéry v prostoru jsou realizovány pouze změnami tahu pohonných jednotek. Na *Obrázku 3* jsou znázorněny smysly směrů otáčení motorů 1 až 4. Motory 1 a 3 mají obvyklý směr otáčení, tedy proti směru pohybu hodinových ručiček - levotočivé (v zahraniční literatuře používaná zkratka CCW – Counter Clockwise Rotation), při pohledu ve směru tahu vyvozeného vrtulemi. Motory 2 a 4 mají opačný smysl otáčení, tedy ve směru hodinových ručiček – pravotočivé (zahraniční literatura tento směr označuje CW – Clockwise Rotation).

Jak již bylo zmíněno, řízení je realizováno pouze změnami tahu vyvozeného pohonnými jednotkami, lze tedy říci, že řízení je pouze metodou Fly-by-Wire. Tuto metodu řízení využívá např. výrobce letadel Airbus. Princip tohoto systému řízení je v převádění řídicích pohybů pák (pohyby řídicích pák pilota) na elektrické signály, které jsou přenášeny pomocí

vodičů na výkonné prvky letadla (motory). Tedy neexistuje mechanické spojení mezi řídicími prvky a výkonnými členy.

Dopředný let podél podélné osy letadla je realizován zvýšením otáček motorů 1 a 2 a naopak snížením otáček motorů 3 a 4. Podobně je prováděn pohyb podél příčné osy. Zvýšením otáček motorů 1 a 4, snížením otáček 2 a 3. Rotace podél svislé osy vyžaduje změnu otáček protilehlých motorů. Např. zvýšení otáček motorů 1 a 3 a současné snížení otáček motorů 2 a 4 vede k rotaci ve směru hodinových ručiček. Stoupání a klesání je pak řízeno změnou otáček všech motorů.

2.4 Popis jednotlivých částí multikoptér

V této kapitole jsou podrobněji uvedeny základní části, ze kterých jsou multikoptéry složeny. Složení se samozřejmě velmi liší podle způsobu jejich použití, proto se zaměřím pouze na komponenty použité při konstrukci navržené kvadroptéry, určené pro pořizování záznamového materiálu.

2.4.1 Pohonné jednotky

Směr otáčení motorů byl definován v předchozí kapitole. Tato kapitola se zabývá použitím vhodných motorů, regulátorů otáček a vrtulí; souhrnně nazývané pohonné jednotky.

Základní rozdělení motorů je na střídavé a stejnosměrné. Pro použití v modelech letadel se výhradně používají stejnosměrné motory, anglicky označované jako BLDC (Brush Less Direct Current). V širokém podvědomí jsou tyto motory nesprávně označovány jako „střídavé“. Brush Less lze přeložit jako bezkartáčový, tudíž motor bez komutátoru.

Motor je složen ze dvou částí, rotoru a statoru. Na statoru jsou umístěny cívky a na vnitřní straně rotoru jsou upevněny permanentní magnety (neodymové magnety), které jsou pevně spojeny s rotačním pláštěm.

Na rozdíl od komutátorového motoru, bezkartáčový motor není schopen provozu bez příslušného regulátoru otáček, který nahrazuje mechanický komutátor. Stejnosměrný proud, kterým je motor napájen, musí být přiváděn do motoru tak, aby postupným přepojováním proudu do cívek se póly rotoru a statoru mohly správně přitahovat a odpuzovat. Přepínání proudu mezi cívkami se nazývá komutace. Komutace probíhá v závislosti na vzájemném úhlovém natočení pólů rotoru a pólů statoru. Musí být tedy vytvořena vazba mezi polohou

rotoru a soustavou, která uskutečňuje komutaci. Během jedné otáčky rotoru se vystřídají všechny statorové cívky a několikrát se v nich změní polarita proudu. Názorný obrázek stejnosměrného motoru je uveden na *Obrázku 4*.



Obrázek 4: Stejnosměrný motor s rotačním pláštěm [5]

Na rozdíl od střídavého motoru nemá stejnosměrný motor stálé otáčky. Otáčky s rostoucím napájecím napětím rostou a klesají se zatížením. Stejnosměrný motor oproti střídavému vyniká svými trakčními vlastnostmi, tj. motor je schopen poskytovat velký moment i při nulových otáčkách; dále pak dobrými regulačními schopnostmi a velkým měrným výkonem. Ke změně otáček motorů slouží regulátory otáček (v zahraniční literatuře označovány jako ESC – Electronic Speed Control). Jejich hlavní funkcí je nahrazovat mechanický komutátor, který ve střídavém motoru není. Regulátor zajišťuje přepínání proudu do správných cívek ve správném okamžiku a k tomu i regulaci otáček změnou šířky proudových pulzů. Regulátor v mnoha případech ještě obsahuje i stabilizátor napětí pro přijímač a serva, v zahraniční literatuře označován jako BEC (Bettery Eliminator Circuit).

Vrtule, která je na *Obrázku 4*, je pevně spojena s motorem. Slouží jako zařízení ke změně rotačního pohybu na tah a naopak. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3.1, vrtule se dělí podle smyslu otáčení na pravotočivé a levotočivé. Směr otáčení se určuje z pohledu ve směru tahu vyvozeného vrtulí. Druhé rozdělení je podle směru tahu vrtule, tj. na tlačné a tažné. Dále je lze dělit podle počtu vrtulových listů. Zvláštním druhem jsou vrtule stavitelné, které za chodu mohou měnit úhel nastavení. Vrtule se liší různorodostí materiálů, ze kterých jsou vyráběny, např.: dřevo, plast, kompozitní materiály apod. Základními požadavky na vrtule jsou

dostatečná tuhost a nízká hmotnost. Tuhost zaručuje, že během různé zátěže vrtulového listu nedochází k jeho kroucení a nízká hmotnost zaručí rychlejší odezvu na změnu otáček motoru. Vrtule se označují dvěma číslicemi. První číslo udává průměr vrtule a druhé číslo udává stoupání vrtule.

2.4.2 Li-Pol akumulátory

Jako palubní zdroj elektrické energie jsou převážně používány lithium-polymerové akumulátory. Tento druh akumulátorů je nástupní podoba Li-Ion akumulátorů, které jsou známé například z mobilních telefonů, fotoaparátů, notebooků a podobně. Li-Pol baterie se liší od ostatních akumulátorů druhem elektrolytu v podobě gelu, který umožňuje výměnu iontů. Baterie jsou složeny z jednoho a více článků v sériovém, popř. sérioparalelním zapojení. Střední vybíjecí napětí jednoho článku má hodnotu 3,7 V. Tímto způsobem lze dosahovat různých variací napětí a kapacit akumulátorů. Největší výhodou Li-Pol akumulátorů oproti jiným druhům akumulátorů je nízká hmotnost a vysoké nabíjecí, či vybíjecí proudy. Další výhodou je minimální samovybitení (jednotky procent za měsíc) a absence paměťové disperze („paměťový efekt“). Ačkoli výhody převažují nad nevýhodami, je třeba i ty zmínit. Akumulátory mají omezený počet nabíjecích/vybíjecích cyklů. Při dosažení mezní hranice začne klesat celková kapacita akumulátoru. Další významnou nevýhodou je možnost podbití akumulátoru (napětí jednoho článku klesne pod 2,7 V). V tomto případě dochází k nenávratnému poškození akumulátoru. Vybíjecí proud je jednou ze základních charakteristik a je označován v jednotkách C (kapacity udávané v mAh).

Pokud je akumulátor složen z více, než jednoho článku, je potřeba při nabíjení jednotlivé články nabíjet zvlášť (balancování napětí v jednotlivých člancích). To zaručí, že během vícenásobného nabíjecího cyklu nebude akumulátor podléhat snížení napětí vlivem nestejněměrného nabití článků. Dále se musí vhodně zvolit nabíjecí a vybíjecí proud. Překročení nabíjecích, či vybíjecích proudů může vést k trvalému poškození baterií.

V porovnání Li-Pol baterií s bateriemi NiCd (nikl-kadmiové) mají Li-Pol baterie výrazně nižší hmotnost. Nevýhodou je ale jejich nižší životnost. Každým nabíjecím a vybíjecím cyklem dochází ke ztrátě kapacity. Průměrný počet cyklů je závislý na proudové zátěži a teplotě, kterým je baterie vystavována.

2.4.3 Řídicí systém stabilizace pro multikoptéry

Multikoptéry zdaleka nedosahují takové stability, jako je tomu u letounů. Multikoptéry jsou nestabilní, protože po vzniku odchylky neexistují vratné aerodynamické momenty, které by působily proti vzniklé odchylce. To vede k nutnosti využívat systémy, které by stabilitu zvyšovaly. Řízení multikoptéry bez těchto stabilizačních systémů je za hranicí možností pilota. Koordinovat požadovanou rychlost a přesnost zásahů je pro pilota příliš náročné.

Pro tento účel jsou vyráběny různé druhy systémů s různým stupněm automatizace, které lze rozdělit na tři základní druhy:

Autonomní řízení - jak již bylo uvedeno výše, během celého letu pilot nemůže zasáhnout do řízení.

Automatické řízení – autopilot letí podle předem stanoveného programu (např. po stanovené trati) a aktivně reaguje na změny podmínek letu, např. změnu směru větru; to poloautomatické řízení neumožňuje. Samozřejmě, trať může pilot za letu měnit.

Poloautomatické řízení – nejjednodušší způsob řízení, který umožňuje operátorovi zasahovat do řízení během celého letu; např. stabilizace polohy, dalším příkladem je povel „zatočit doprava“, letadlo točí doprava až do chvíle, kdy operátor zadá jiný příkaz.

Na trhu je velké množství stabilizačních systémů, které mohou být doplněny velkým množstvím nadstandardního vybavení. Budu se zabývat pouze základními znaky, které stabilizační systémy mají.

Měření náklonů je vypočítáváno pomocí elektrických gyroskopických přístrojů v kombinaci s akcelerometry. Informace z těchto senzorů jsou dále zpracovávány v mikroprocesorech.

„Princip elektronického gyroskopu je v měření rychlosti rotace. V mikrostruktuře gyroskopu je seismická hmotnost m , která se pohybuje ve směru osy X rychlostí v . Pokud se senzor otáčí kolem osy Z nenulovou úhlovou rychlostí ω_Z , působí na seismickou hmotu díky Coriolisově efektu síla $F_{CORIOLIS}$. Tato síla se vypočte podle vztahu:

$$F_{CORIOLIS} = -2 \cdot m \cdot \omega_Z \cdot v \quad (1)$$

Velikost výchylky hmoty ve směru osy Y je přímo úměrná velikosti této síly, a tím i přímo úměrná velikosti a směru rotační rychlosti. Velikost výchylky je měřena vnitřní elektronikou senzoru jako změna kapacity. Seismická hmota se pohybuje tam a zpět, proto se tento princip nazývá vibrační. “ [8]

Akcelerometr je senzor umožňující měřit zrychlení v určité velikosti a směru. Pokud požadujeme měření v prostoru, je zapotřebí umístit senzor do každého směru souřadnicového systému, tedy celkem tři. Princip systému spočívá v druhém Newtonově zákoně, zákonu síly.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (2)$$

Pokud známe hodnotu zrychlení a , hmotnost setrvačné hmoty m , pak můžeme podle vzorce (2) vypočítat působící sílu F . Časovou integrací zrychlení lze získat rychlost a následnou časovou integrací rychlosti získáme dráhu. Výpočet pro osu X a při konstantní síle F je uveden ve vzorcích (3) a (4):

$$v_x = \int \frac{F_x}{m} dt = \frac{F_x}{m} \cdot t + v_{0x} \quad (3)$$

$$x = \int \left(\frac{F_x}{m} \cdot t + v_{0x} \right) dt = \frac{F_x}{m} \cdot t^2 + v_{0x} \cdot t + x_0 \quad (4)$$

Hodnoty v_{0x} a x_0 jsou počáteční podmínky.

2.4.4 Stabilizační systém pro záznamová zařízení

V předchozí kapitole je popsán princip stabilizace řídicího systému multikoptéry. Pokud ji však chceme použít pro účely pořizování záznamového materiálu, je třeba na palubu multikoptéry umístit kromě kamery, či fotoaparátu, i systém, který bude vyrovnávat veškeré úhlové náklony celého zařízení. Takové stabilizační jednotce se říká „gimbal“ a je svým charakterem složení senzorů velice podobná stabilizačnímu systému, který je popsán v předchozí kapitole. Sensory jsou doplněny o vyrovnávací motorky nebo servomotory, které zastávají funkci činných prvků. Podle počtu rovin, ve kterých je gimbal stabilizovaný, lze rozlišit jednoosou, dvouosou a tříosou stabilizaci. Snímací zařízení je uloženo v kardanově závěsu. Příklad dvouosé stabilizace kamery je na *Obrázku 5*.

Na *Obrázku 5* jsou zobrazeny dva korekční motorky a řídicí jednotka. Pro eliminaci vibrací vznikajících od pohonné jednotky multikoptéry jsou použity tlumící silentbloky.



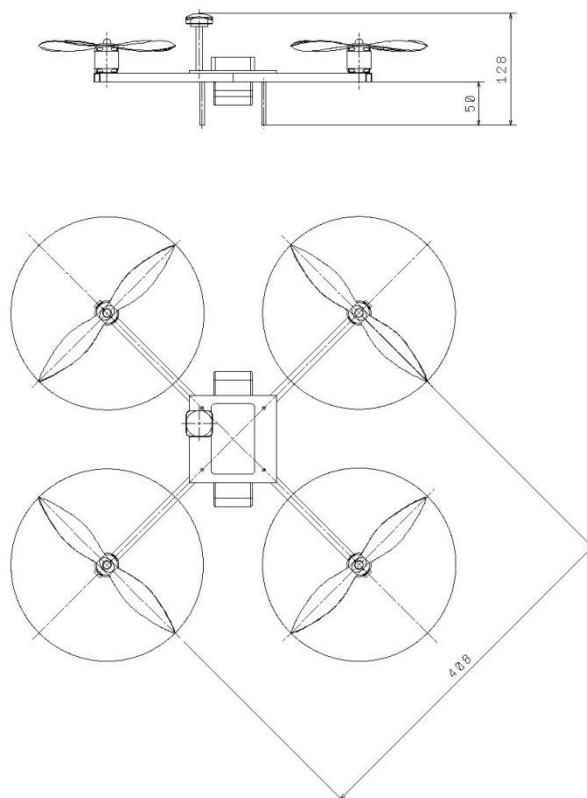
Obrázek 5: Dvouosá stabilizace kamery [30]

3. Technické parametry, výběr vhodného typu a konstrukce

Jedním z cílů diplomové práce bylo navrhnout bezpilotní letadlo, které by bylo schopné pořizovat záznamový materiál a bylo schopné vertikálního vzletu a přistání. Těmto požadavkům nejlépe vyhovuje multikoptéra, která byla navržena tak, aby byla schopna nést na palubě zařízení pořizující filmový záznam.

3.1 Konstrukce rámu prototypu

Pro zkušební účely bylo nutné zkonstruovat prototypový rám kvadrokoptéry, který sloužil k testování nastavení potřebných parametrů a nastavení režimů letu. Na tento rám nebylo nainstalováno žádné záznamové zařízení, sloužil pouze k provedení několika testovacích letů. Prototypový rám byl vytvořen z hliníkové slitiny podle rozměrů uvedených na *Obrázku 6*.



Obrázek 6: Základní rozměry prototypového rámu kvadrokoptéry

Nejdůležitějším rozměrem je osová vzdálenost pohonných jednotek, která má hodnotu 408 mm. Tento rozměr určuje celkovou velikost kvadrokoptéry. Záměrně byla volena hodnota, která bude zvolena i na druhém, uhlíkovém rámu. Ostatní komponenty, které byly připevněny na prototypovém rámu, byly použity i na druhém rámu.

Čtvercová platforma má rozměry 100 x 100 mm a byla vyrobena z hliníkové slitiny tloušťky 3 mm. Ramena byla zhotovena z hliníkového profilu taru U s rozměry 10 x 10 x 2 mm. Celá konstrukce byla sešroubována šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem o rozměru M3 x 10 mm zajištěnými šestihrannými maticemi rozměru M3 x 2,4 mm.

Během prvních zkušebních letů jsem zjistil, že již při relativně malé vzdálenosti kvadrokoptéry od pilota (přibližně 10 m v dobrých světelných podmínkách) docházelo ke ztrátě orientace pilota o poloze kvadrokoptéry. Prototypový rám z tohoto důvodu byl ještě vybaven osvětlením, které při letu napomáhá snadnějšímu určení polohy přední a zadní části kvadrokoptéry. Osvětlení bylo vytvořené z LED pásků zelené (přední část) a červené barvy (zadní část), napájené z palubního zdroje. Vzletová hmotnost celého letadla byla 1071 g.

3.2 Jednotka autopilota

Při výběru řídicí jednotky neboli autopilota, je třeba zhodnotit požadavky, které od autopilota očekáváme. V našem případě snímkovací kvadrokoptéry je třeba, aby autopilot umožňoval stabilizaci polohy v prostoru nebo automatický let po předem definované trase a jiné módy, které by zjednodušily pořízování záznamového materiálu. Po zvážení požadavků byl vybrán autopilot typu Pixhawk, dodávaný americkým výrobcem 3D Robotics. Jedná se o „open-source“ software, založený na Arduino systému, který umožňuje přístup uživatele ke zdrojovému kódu a jeho editaci. Tento software je možné přizpůsobit podle individuálních potřeb uživatelů, které lze prostřednictvím komunity vývojářů bezplatně sdílet a aktualizovat. Arduino je elektronická platforma, která je určena pro vývojáře digitálních a interaktivních prostředí, které mohou snímat parametry vnějšího prostředí a řídit sami sebe. Autopilot Pixhawk se tak stává velmi vhodným prostředkem pro použití k výzkumným účelům. Jeho určení není pouze jednostranné, pro multikoptéry, ale lze jej použít i v jiných zařízeních, jako je model letadla, model vrtulníku, model auta, nebo model lodi.

Autopilot Pixhawk je složen ze dvou základních částí: FMU a IO.

FMU (Flight Management Unit) – palubní řídicí jednotka autopilota. Spojuje funkce autopilota, inerciálních měřících systémů a umožňuje ovládání letadla. Měřící senzory použité

v jednotce Pixhawk: 3D ACC / Gyro (MPU – 6000) – senzor typu MEMS (Microelectromechanical System), křemíkový senzor, který měří prostorovou polohu a zrychlení pomocí diskretních měření. Měření zrychlení v osách X, Y a Z provádí akcelerometry, které spolu se třemi gyroskopy snímají rotace kolem os X, Y a Z, poskytují tak šestiosou informaci o prostorové poloze.

3D Gyro (L3GD20) – druhý gyroskopický digitální senzor typu MEMS, který snímá polohu v třírozměrném prostoru a používá k přenosu protokol 12C (komunikace s jedním, nebo více čipy přes řídicí „master“ čip).

3D Mag (HMC5883L) – digitální magnetometr určený pro snímání velmi slabého magnetického pole Země. Magnetometr se vyznačuje především svou vysokou přesností 1 – 2° a možnost přenosu protokolu 12C.

Barometric pressure (MS5611) – senzor pro měření barometrického tlaku, používaný pro určení výšky a vertikální rychlosti s rozlišovací schopností 10 cm. Tento senzor zahrnuje i čidlo pro přesné snímání teploty. Snižuje tak nejistotu měření vlivem rozdílných teplot.

IO (Input/Output module) – zdroj napájení FMU a rozšířený modul pro řízení letu. Poskytuje výstupy pro řízení serv, přijímač a pro mnohé další výstupy.

Řízení autopilota je pak prováděno PID algoritmem.

3.2.1 PID řízení autopilota

PID řízení je velmi často používané v regulačních algoritmech řídicích procesů. Zahrnuje práci s daty získanými z výstupů senzorů. Autopilot Pixhawk využívá jako zdroj senzory, které byly popsány v předchozí kapitole, jednotky FMU. PID regulátory se skládají ze tří reakcí: proporcionální, integrační a derivační. Jedná se o zpětnovazební regulaci nasbíraných dat, generovaných v senzorech a následný výpočet reakce mezi požadovanou hodnotou a daty ze senzorů. PID řízení je přes svoji jednoduchost velmi citlivé na seřízení.

Autopilot Pixhawk umožňuje ladění jednotlivých složek PID řízení. Po nastavení vhodného rámu kvadrokoptéry a kalibraci akcelerometrů byly výrobcem doporučeny tyto hodnoty PID:

Klonění (Roll)	Klopení (Pitch)	Bočení (Yaw)
P: 0,150	P: 0,150	P: 0,200
I: 0,100	I: 0,100	I: 0,020
D: 0,004	D: 0,004	D: 0,001

Obecně lze říci, že čím jsou vyšší hodnoty parametrů PID, tím citlivější bude ovládání multikoptéry. Čím jsou hodnoty nižší, tím bude reakce pomalejší. Pokud budou hodnoty nastaveny příliš vysoké, bude docházet k oscilaci okolo požadované polohy. V případě příliš nízkých hodnot, multikoptéra se bude pomalu přesouvat na jinou polohu.

3.2.2 Rozmístění výstupů autopilota Pixhawk

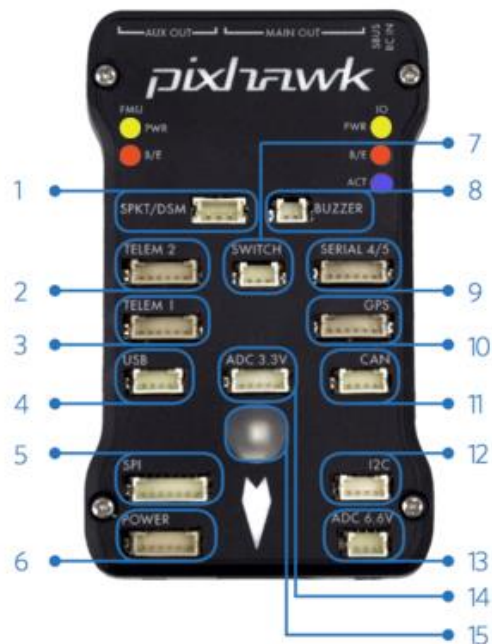
Obrázky 7 a 8 popisují rozmístění jednotlivých konektorů autopilota (konektory typu DF13) a význam indikací LED (Light-Emitting Diode). Bílá šipka ve spodní části autopilota naznačuje směr, který bude odpovídat kladnému směru osy X, čili dopředný směr letu. V levé horní části autopilota je barevná indikace stavu FMU jednotky. Pokud svítí žlutá barva PWR, jednotka FMU je napájena. Blikající oranžová barva B/E indikuje přetížení CPU (Central Processing Unit – zahlcení procesoru jednotky FMU). Rychlé blikání oranžové barvy vyjadřuje instalaci aktualizace softwaru. Pokud nesvítí žádná barva, systém je v pořádku. Indikace PWR a B/E je totožná i pro IO v pravé horní části obrázku. IO navíc ještě zahrnuje kontrolu stavu ACT (Activity) – pomalé blikání znamená, že systém je v pořádku.

Horní část autopilota AUX OUT poskytuje možnost připojení až šesti externích zařízení, jako např. vypínače pro ovládání kamery. Konektory s označením MAIN OUT jsou určeny k připojení řídicího signálu pohonných jednotek, maximálně osmi. Výstup SBUS, podobně jako u konektoru SPKT/DSM, je určen pro připojení přijímače od výrobce Futaba. Poslední výstup RC IN je totožný s SBUS, podporuje však všeobecný výstup pro signál s modulací PPM.

Význam číselných pozic pro *Obrázek 7*:

1. SPKT/DSM – výstup, který je navržen pouze pro přijímač výrobce Spektrum
2. TELEM 2 - dálkový přenos dat pomocí datového spoje určený na přenos obrazu
3. TELEM 1 – dálkový přenos dat pomocí datového spoje
4. USB – výstup pro použití externí USB/LED
5. SPI – výstup datového protokolu pro externí zařízení
6. POWER – zdroj napájení autopilota
7. SWITCH – bezpečnostní tlačítko pro odemčení/uzamčení pohonných jednotek
8. BUZZER – akustický signalizátor
9. SERIAL 4/5 – výstup pro data z druhého GPS přijímače

10. GPS – výstup pro data z GPS přijímače
11. CAN – víceúčelová sběrnice pro komunikaci
12. I2C - výstup určený pro magnetický kompas
13. ADC 6,6 V – analogově digitální převodník 6,6 V
14. ADC 3,3 - analogově digitální převodník 3,3 V
15. LED – signalizátor stavu autopilota



Obrázek 7: Rozmístění konektorů na horní straně autopilota Pixhawk [10]

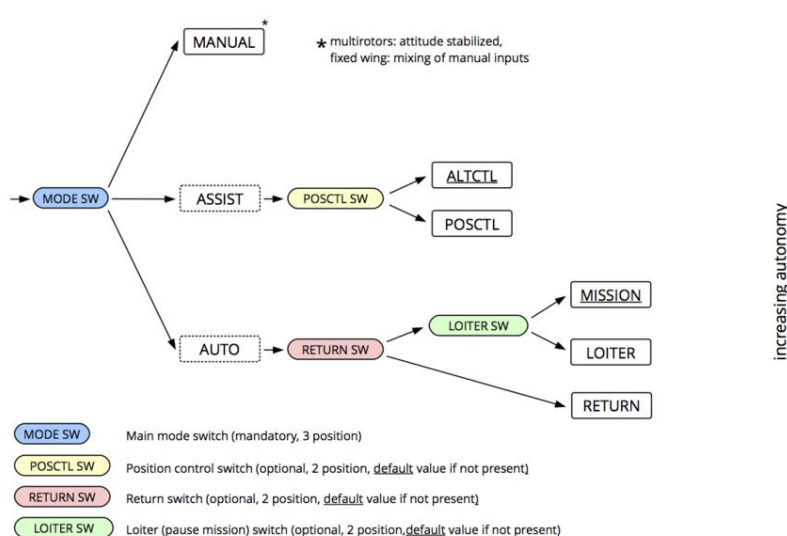


Obrázek 8: Rozmístění konektorů na bočních stranách autopilota Pixhawk [10]

Význam číselných pozic pro *Obrázek 8*:

1. Tlačítko reset pro celé zařízení
2. SD paměťová karta
3. Tlačítko reset pro FMU
4. Výstup micro USB pro komunikaci

Autopilot může být provozován v několika letových módech, které jsou velmi nápomocné při samotném letu. Hierarchii automatizace řízení v módech zobrazuje *Obrázek 9*.



Obrázek 9: Hierarchie automatizace řízení [10]

Modrý ovál MODE SW určuje rozdělení do tří základních režimů letu. MANUAL je řízení pilotem, bez jakékoli podpory autopilota. Tento druh letu je velmi obtížný na pilotáž, proto nebývá příliš využíván. Mnohem častější je režim ASSIST, který pilotovi napomáhá v řízení letu. Mezi základní prvky se řadí stabilizace polohy a stabilizace výšky. Autopilot pak vyhodnocuje měřená data a provádí taková opatření, aby se neodchýlil od stanovených výchozích hodnot. Režim AUTO je prostředek poskytující automatický režim letu. Takový let může být pilotem, po aktivaci, kdykoli přerušeno a pilot tak může přejít zpět na MANUAL, nebo ASSIST řízení. Mód letu LOITER je automatické udržování stanovené výšky a pozice, zadané jako souřadnicová poloha v prostoru. Mód MISSION umožňuje vytvoření letového plánu. Autopilot provede let po definované trati. Posledním popsáním módem je RETURN mód, který je velmi užitečnou pomůckou, neboť dokáže navrátit multikoptéru zpět k pilotovi.

Autopilot Pixhawk disponuje širokou škálou možností využití. Zde byl popsán pouze informační přehled jeho funkcí a jejich výhody. Výrobce, společnost 3D Robotics, poskytuje detailní popis veškerých možností využití. Takto detailní popis autopilota je nad rámec diplomové práce. Veškeré potřebné informace jsou dostupné z webového zdroje [22].

3.2.3 Družicová navigace

Jako přijímač GPS signálu pro autopilota jsem vybral výrobcem autopilota Pixhawk, 3D Robotics, doporučený přijímač uBLOX (*Obrázek 10*). Přijímač zahrnuje integrovaný kompas HMC5883L. Tento kompas je totožný s kompasem instalovaným v FMU části autopilota Pixhawk. Musí být proto nainstalovaný na palubu multikoptéry ve shodném směru, jako je směr kladné osy X autopilota. Odchylka instalace obou kompasů může být maximálně 45°. Samotný GPS přijímač se vyznačuje nízkou energetickou náročností. Pro příjem GPS signálu je použitý GPS modul typu LEA-6H. Tento modul je schopný pracovat s GPS signálem i se signálem družicového navigačního systému Galileo. Před použitím je pouze nutný upgrade softwaru přijímače.



Obrázek 10: uBLOX – přijímač satelitní navigace [10]

3.2.4 Datový spoj a použitý software pro komunikaci s autopilotem

Komunikačních rozhraní mezi uživatelem a autopilotem je velké množství. Při výběru jsem dal přednost softwaru Mission Planner, který je vydáván jako freeware. Umožňuje veškerou podporu funkcí autopilota Pixhawk, včetně aktualizace firmwaru. Zároveň slouží pro správu

dat a jejich sdílení. Komunikace autopilota s pozemní stanicí je možná prostřednictvím datového spoje bezdrátového nebo za použití datové sběrnice. Při volbě datového spoje je jediným řešením bezdrátová varianta pro komunikaci s pozemní stanicí a pro telemetrický přenos během letu. Lze tak sledovat veškerá data, která jsou generována v jednotce autopilota, např. polohu, rychlost, výšku apod. Lze také během letu zadávat příkazy, na jakou souřadnicovou pozici se má multikoptéra přesunout a do jaké výšky. Dále lze zadávat během letu nové letové plány.

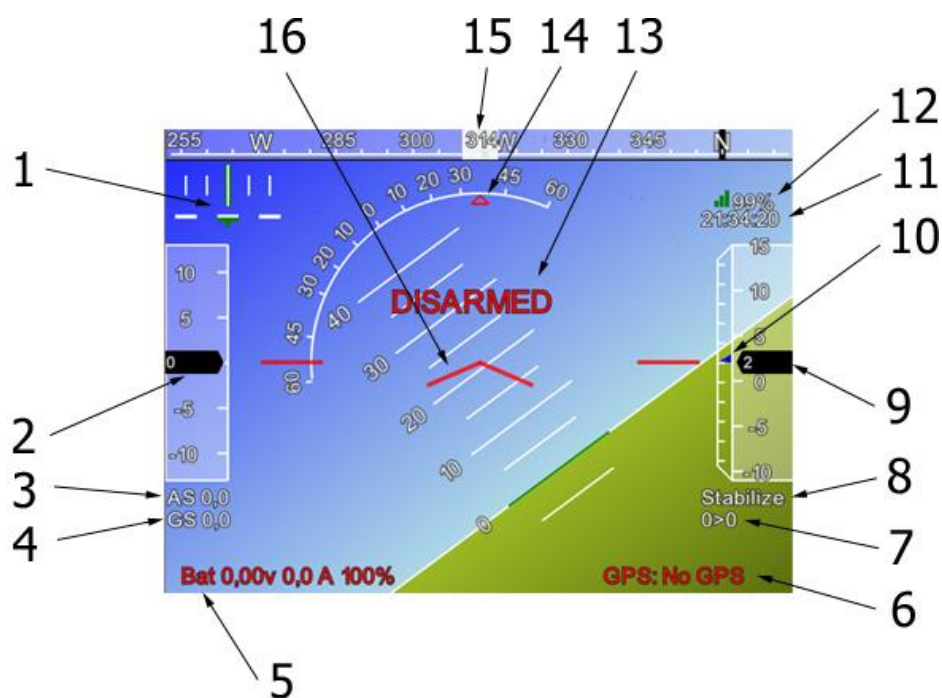
Na *Obrázku 11* je zobrazena použitá telemetrie pro snímkovací kvadrokoptéru. Pro telemetrický přenos je Českým telekomunikačním úřadem vyhrazeno pásmo 433 MHz. Telemetrie se skládá z pozemní a palubní části. Jedná se o oboustranné spojení, tedy obě části jsou zároveň vysílačem i přijímačem. Tento konkrétní typ má výkon 100 mW, s použitou anténou je dosah při přímé viditelnosti až 300 m.



Obrázek 11: Pozemní a palubní část telemetrického přenosu [41]

Telemetrický přenos je interpretován na uživatelském rozhraní, jako HUD (Head Up Display), čili indikace shodná s umělým horizontem. Na *Obrázku 12* je příklad indikace umělého horizontu. V konkrétním případě umělý horizont indikuje pravý náklon přibližně 37° a úhel stoupání 20°. Předěl země – vzduch je v klasickém rozdělení, výjimku tvoří část „země“, která má netypickou zelenou barvu.

Pro pořizování videa nebo snímků, je třeba multikoptéru umístit na pozici, ze které požadujeme pořídit patřičný záznam. Toho lze dosáhnout řízením pilota ze země, ale odhad polohy a výšky v prostoru je velmi obtížný. Mission planner umožňuje plánování letu, nebo pozic a směrů, ze kterých chceme provádět snímkování. Lze tedy dopředu naplánovat celou trasu letu multikoptéry. Jedná se tedy o zcela automatický let, který zahrnuje start i přistání.

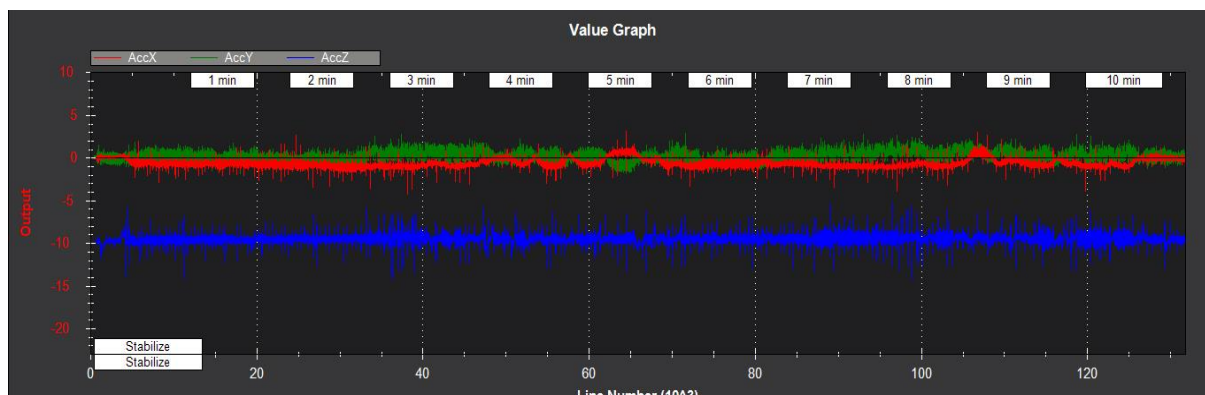


Obrázek 12: Head Up Display

1. Odchylka od tratě, 2. Indikace rychlosti (pokud není připojen senzor na snímání rychlosti letu, indikace je shodná s GS), 3. Rychlost letu IAS, 4. Rychlost vůči zemi (Ground Speed), 5. Údaje o baterii (napětí [V], aktuální odběr [A] a procentuální zbytková kapacita), 6. Stav GPS (v tomto konkrétním případě není GPS připojená), 7. Vzdálenost k dalšímu otočnému bodu – „Waypoint“, 8. Mód, ve kterém se systém nachází, 9. Výškoměr – indikace je pouze nad místem, kde byl autopilot „odemčen“, tedy indikace QFE, 10. Indikace vertikální rychlosti, 11. UTC čas získaný z GPS, 12. Procentuální vyjádření stavu datového spoje, 13. Indikace armed/disarmed, 14. Symbol náklonu, 15. Indikace magnetického kompasu, 16. Symbol letadla.

Jako jednu z mnoha výhod hodnotím možnost zaznamenávání a interpretace veškerých dat pořízených během letu, zaznamenávaných do tzv. „logu“. V programu Mission planner lze tyto data analyzovat a dále je vyhodnocovat. Jako příklad zde uvádím záznam vibrací během

letu. Vibrace mohou být způsobeny nesprávným vyvážením vrtulí a vnášejí do celého systému nepřesnost měření senzorů polohy. V *Grafu 1* je příklad naměřených hodnot vibrací kvadrokoptéry.



Graf 1: měření vibrací na osách X,Y,Z

Pro měření vibrací bylo použito akcelerometrů jednotky FMU. Červenou barvou jsou zobrazeny vibrace v ose X, zelená barva je pro vibrace v ose Y. Pro správné (maximální) hodnoty jsou pro osy X a Y v rozmezí -3 až 3 m/s^2 . Vibrace v ose Z jsou v rozmezí -5 až -15 m/s^2 . Podle grafu na *Obrázku 9* jsou vibrace ve všech směrech v doporučeném rozmezí.

3.2.5 Přijímač a vysílač

Pro účely řízení kvadrokoptéry jsem zvolil řídicí jednotku – vysílač značky Graupner, typ Mc-19. Pro řízení postačí i základní vysílač s minimálním počtem pěti kanálů. Vysílač přes potenciometry snímá polohu řídicích pák pilota a vysílá je v podobě elektrického signálu do přijímače. Pro přenos signálu byl použit vysílací modul Duplex pracující v pásmu 2,4 GHz s PPM modulací (Pulzně polohová modulace), která tvoří řídicí signál pro autopilota Pixhawk.

3.2.6 Pohonná jednotka kvadrokoptéry

Při návrhu pohonné jednotky jsem uvažoval s maximální vzletovou hmotností kvadrokoptéry v rozmezí 1200 - 1400 g. Tomu odpovídá střídavý motor výrobce T-motor s označením produktu Airgear 350. Tento střídavý motor s rotačním pláštěm a s charakteristikou 920 KV odpovídá navrženým hmotnostním požadavkům.

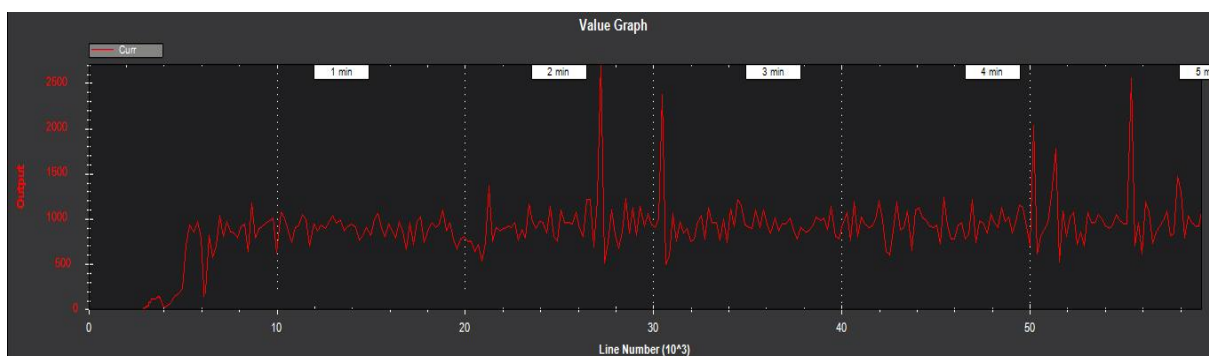
Rozměr jednotky KV odpovídá vztahu:

$$KV = \frac{\Omega_0}{v_m} \quad (5)$$

Ω_0 – počet otáček za minutu

v_m – elektrické napětí ve voltech

Při použití baterie s napětím 11,1 V dosahuje motor maximálních otáček 8300 ot/s s konstantním odběrem 9,8 A. Podle odběru lze navrhnout regulátor otáček. Při plném zatížení a maximálních otáčkách může motor mnohonásobně navýšit odběr, proto jsem navrhl regulátor otáček s maximální konstantním odběrem 20 A, ve špičce odběru až 30 A (po dobu 10 vteřin). V Grafu 2 je zobrazen odběr proudu z baterií během pěti minutového letu. Jak je vidět z grafu, maximální proudové zatížení dosáhlo skokově maximální hodnoty až 27 A, v čase kratším, než 10 s. Můžeme považovat regulátor otáček za vhodně zvolený. Měření proběhlo s plastovými vrtulemi o průměru 9,5“ a stoupání 4,5“.



Graf 2: Proudové zatížení regulátoru

3.2.7 Použité Li-Pol akumulátory

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.4.2, zvolil jsem jako palubní zdroj elektrické energie lithium-polymerovou baterii složenou ze tří článků, které dodávají napětí 11,1 V a kapacitu 5000 mAh. Kapacita 5000 mAh vystačí na 23 minut letu za podmínky, že v baterii z bezpečnostních důvodů zůstane 20 % záloha kapacity, tedy 1000 mAh a napětí neklesne pod hranici 10,5 V. Doba letu je nepřímo úměrná hmotnosti kvadrokoptéry.

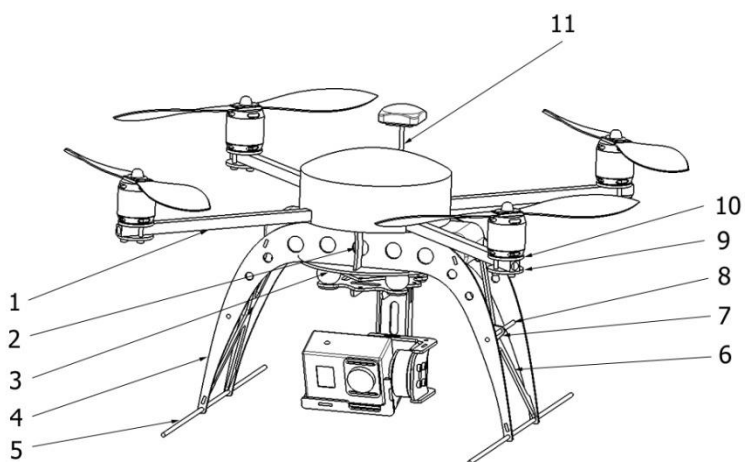
3.2.8 Výroba rámu

Rám kvadrokoptéry byl přizpůsoben použitým komponentům, zmíněných v předcházejících kapitolách. Celý návrh byl vytvořen za pomoci v modelovacího programu Catia V5. Na *Obrázku 13* je náhled vizualizace 3D modelu.



Obrázek 13: Vizualizace 3D modelu kvadrokoptéry

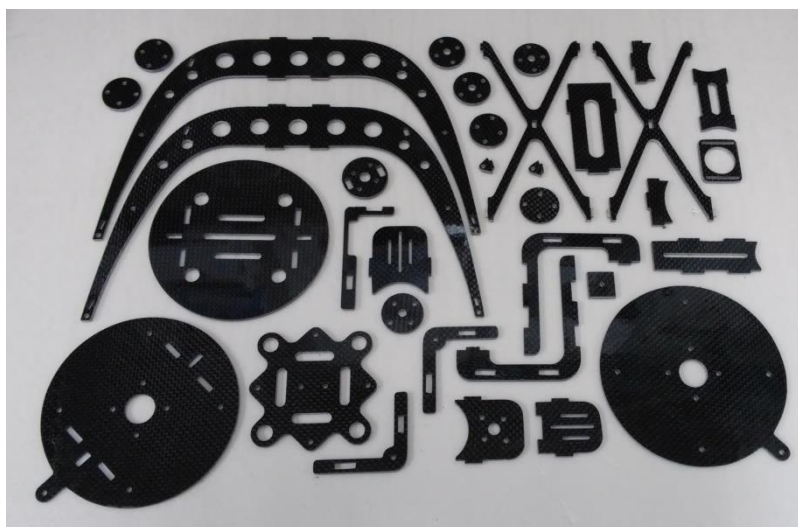
Cílem vytvoření 3D modelu je následné odvození technických výkresů, potřebných pro účely certifikace a pro tvorbu podkladů, potřebných pro výrobu. Samotnou vizualizaci lze využít k prezentačním účelům.



Obrázek 14: Schéma rámu a jeho částí

1. Rameno motorového lože vyrobené z tyče čtvercového průřezu, 8x8 mm, 2. Vzpěra podvozkové nohy, 3. Spodní deska pro uchycení gimbalu, celkově jsou použity tři, 4. Podvozková noha, 5. Lyžina, 6. Diagonální vzpěra pro zvýšení tuhosti, 7. Spojka diagonální vzpěry a rozpěrné tyče, 8. Rozpěrná tyč, 9. Spodní část motorového lože, 10. Horní část motorového lože, 11. Držák GPS.

Rám je téměř celý tvořen z uhlíkových materiálů. Na *Obrázku 14* je náhled částí rámu. Pozice 5, 8 a 11 jsou vyrobeny z uhlíkové kulatiny s podélnými vlákny, o průměru 3 mm. Zbytek částí byl vyřezán z kompozitního materiálu, který obsahuje vnější vrstvy z uhlíkové tkaniny gramáže 100 g/m² a z balsových jader o tloušťce 1 mm. Mezi jednotlivými jádry je použita uhlíková tkanina o gramáži 50 g/m². Kompozit je slepený epoxidovou pryskyřicí. Tuhnutí probíhalo v lisu o síle přibližně 5000 N. Výsledná tloušťka desky byla 3 mm. Následně bylo zvoleno optimální rozmístění jednotlivých dílů na kompozitní desku a vyfrézováno CNC frézku. Rozmístění a výsledný výrobek je na *Obrázku 15*.

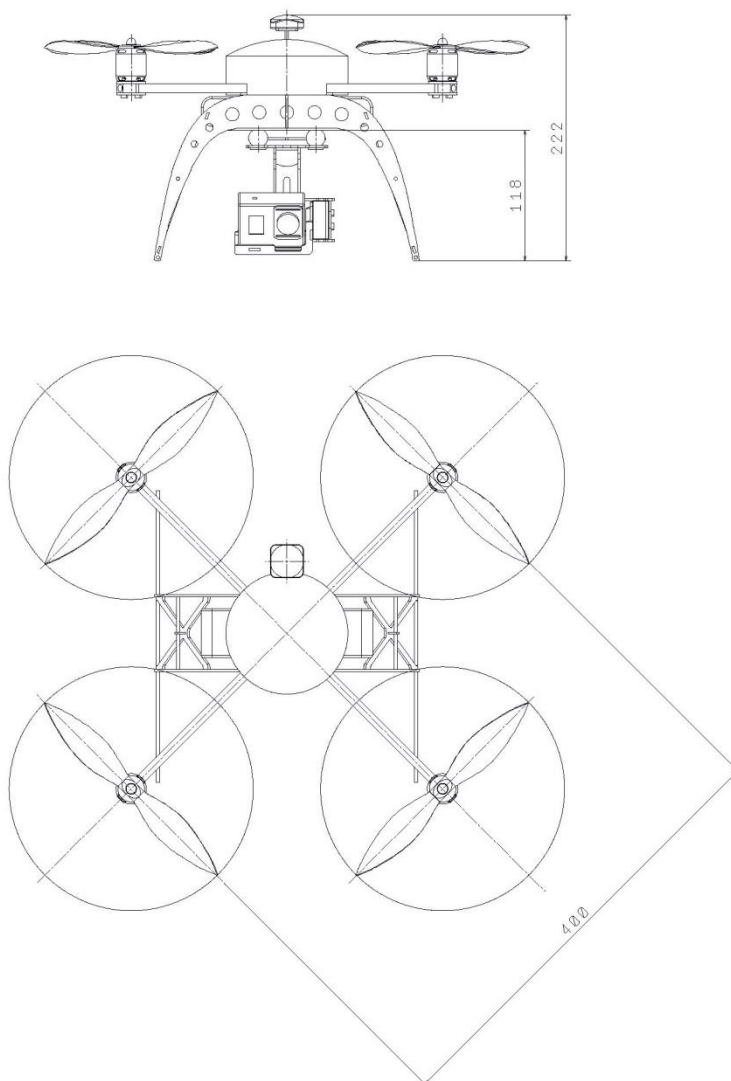


Obrázek 15: Uspořádání kompozitních dílů po vyřezání CNC frézku

Tvar konstrukce byl zvolen podle vlastního uvážení a předchozích zkušeností s konstrukcí modelů letadel. Uhlíkový materiál jsem volil z důvodu vysoké pevnosti a nízké hmotnosti. Některé z dílů, např. podvozkové nohy, byly ještě odlehčeny, aby se co nejvíce snížila hmotnost rámu.

Spojení všech dílů bylo provedeno epoxidovým lepidlem, vyjma spoje mezi rameny a vrchními deskami. Tento spoj byl sešroubován šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M3 x 15 mm, zajištěnými šestihrannými maticemi M3 x 2,4 mm, pro možnou demontáž a opravu v případě poškození. Celková vzletová hmotnost celé kvadrokoptéry je 1320 g.

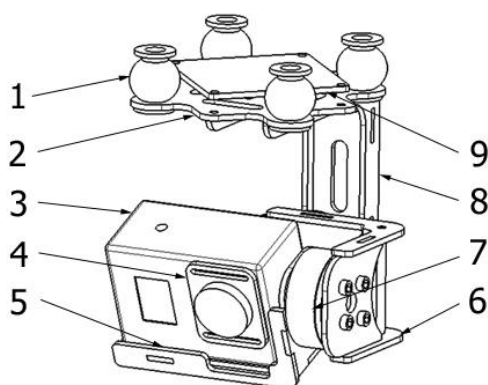
Na *Obrázku 16* je uvedeno schéma výkresu s hlavními parametry rámu. Příloha 3.1 a 3.2 této diplomové práce obsahuje výkres sestavy kvadrokoptéry a kusovníku použitých komponentů při stavbě.



Obrázek 16: Základní rozměry uhlíkového rámu kvadrokoptéry

3.2.9 Gimbal

Stabilizace kamery – gimbal je ve schematickém zobrazení na *Obrázku 17*. Jedná se o dvouosou stabilizaci v rovinách X a Y. Rotace okolo osy Z byla záměrně nestabilizována. Pokud by došlo k pootočení kamery v této ose, kamera by se mohla dostat do úhlového pootočení, ve kterém by byla část podvozku v záběru kamery a znehodnotila by tak pořizovaný záznam. Pokud tato osa je nepohyblivá, je nutné otočit celou kvadrokoptérou, aby byl zachycen požadovaný úhel záběru.



Obrázek 17: Schéma gimbalu

1. Tlumící silentbloky, 2. Deska pro uchycení řídicí jednotky gimbalu, 3. GoPro kamera, 4. Držák kamery, 5. Kamerové lože, 6. Držák stabilizačního motoru osy Y, 7. Stabilizační motor, 8. Rameno gimbalu, 9. Řídicí jednotka

Pro snímání polohy je použito, stejně jakou u autopilota, jednotek IMU (Inertial Measurement Unit), tedy senzory pro výpočet rychlosti, orientace a gravitační síly. Opět bylo prioritou výběru systém „open-source“ systém. Nejvhodnější jednotkou pro požadované účely je řídicí jednotka Storm32, která je svou charakteristikou univerzální řídicí jednotkou pro všechny typy gimbalů. Pro správnou funkci bylo opět nutné nastavit parametry PID. V tomto případě byly hodnoty nastaveny empiricky.

Klonění (Roll)	Klopení (Pitch)
P: 0,700	P: 0,700
I: 15,000	I: 15,000
D: 0,025	D: 0,025

Dvouosá stabilizace je realizovaná dvěma motory, tedy stabilizace BGC (Brushless Gimbal Controller). Opět bylo použito, stejně jako pohonné jednotky, střídavých motorů s rotačními plášti. Charakteristika motorů je 210 KV. Místo motorů lze použít i ovládání servy, ale pohyby serv reagují na změnu větší odezvou a neplynulým chodem. Tyto důvody vedly k použití motorů.

3.2.10 Záznamové zařízení

Důležitými parametry výběru záznamového zařízení jsou jeho hmotnost a rozměry. Tyto základní parametry velmi úzce souvisely s návrhem kvadrokoptéry. Základním požadavkem byla nízká hmotnost, malé rozměry a dostatečná kvalita záznamu. Jedním z produktů, které toto splňovaly, byla kamera GoPro Hero, která je schopna snímat video v rozlišení HD, tedy 1920 x 1080 s úhlem záběru 127°. Záznam z kamery je ukládán na externí úložiště, SD kartu o kapacitě 32 GB, což umožňuje délku videa více než tři hodiny.



Obrázek 18: Kvadrokoptéra s naznačenou oblastí záběru kamery

Na *Obrázku 18* je znázorněna kvadrokoptéra a žlutou barvou naznačený kónus, který zobrazuje prostor snímáný kamerou. Úhlový náklon kamery je 20°. Úhel je nastaven do polohy, ve které bude s největší pravděpodobností pořizován záznam ve vodorovném letu. Během letu může být úhel měněn, záleží na pokynech operátora kamery.

3.2.11 Osvětlení kvadrokoptéry

Z důvodu značné podobnosti za letu v různých úhlech natočení je pro pilota velice obtížné rozeznat, v jakém úhlovém natočení se kvadrokoptéra nachází. Z tohoto důvodu byly na spodní stranu ramen umístěny LED pásy. Každý pásek je složen z devíti LED ve dvou provedeních: zelené (přední část) a červené (zadní část). LED mají velmi nízkou energetickou náročnost a mohou být připojeny na palubní zdroj bez nutnosti použití externího zdroje napájení. Napájecí napětí LED z baterie je 11,1 V.

3.2.12 Testovací let kvadrokoptéry

Během testovacích letů na prototypovém rámu došlo k zásadní havárii. Kvadrokoptéra letěla v módu stabilizace polohy a setrvala na jednom místě ve výšce 25 m nad terénem. Při aktivaci módu RTL došlo k zastavení všech motorů a nekontrolovatelnému pádu na zem. Pozdější analýza letových dat z autopilota Pixhawk ukázala, že celý systém přestal pracovat z důvodu vzniku zkratu autopilota. Zkrat v řídicí jednotce autopilota způsobil výpadek celého řízení a nekontrolovatelný pád. Celá tato událost byla sdělena výrobcí autopilota Pixhawk, 3D Robotics, technickému oddělení. Díky aktivnímu přístupu ze strany technického oddělení byla jednotka autopilota nahrazena novou jednotkou. Velice oceňuji korektní jednání firmy 3D Robotics. Tímto bych rád poukázal na to, že i sofistikovaný systém nemůže být považován za naprosto spolehlivý. Přes všechny aktivní prvky bezpečnosti může dojít k jeho selhání. Je třeba zaměřit pozornost i na pasivní prvky, které se začínají objevovat na trhu bezpečnostních systémů. Jako nejúčinnější pasivním prvkem bezpečnosti hodnotím záchranné padákové systémy pro bezpilotní letadla. Princip záchranného systému je totožný se systémem používaným u ultralehkých letounů a některých letounů všeobecného letectví. Mezi přední výrobce těchto záchranných systémů pro bezpilotní letadla se řadí český zástupce GRS Galaxy.

4. Možnosti využití pro výzkumné projekty

První výzkumy v oblasti bezpilotních zařízení byly určeny výhradně pro armádní využití. Bepilotní zařízení byla navržena tak, aby operovala v místech, která byla pro člověka příliš nebezpečná, nebo nevyžadovala přítomnost pilota na palubě letadla. Uvolnění těchto technologií do civilní sféry znamenalo rychlé rozšíření a zároveň rychlý pokrok v oblasti technologie.

4.1 Biologická ochrana a monitorování perimetru letišť

Tato kapitola je zaměřena na možnost využití při ochraně letišť před ptáky a zároveň na monitorování prostoru v blízkosti letišť. Při volbě zařízení pro ochranu a monitorování letiště lze uvažovat mezi modelem letadla s pevnými nosnými plochami, nebo multirotorovým letadlem. Klasický letoun dominuje nad multikoptérou svým doletem a výdrží. Pro tyto účely bude ale nejlepším řešením zvolit kvadroptéru. Její provoz nevyžaduje vzletovou a přistávací dráhu a má možnost setrvávat ve vzduchu bez nutnosti dopředného pohybu.

4.1.1 Biologická ochrana letišť pomocí bezpilotního zařízení

Bezpečnost letového provozu je bezesporu prioritní v porovnání s negativními dopady této ochrany na životní prostředí. Negativními dopady jsou hlavně úhyny ptáků, rušení přirozeného života ptáků a přirozené migrace ptáků, narušení přirozených ekosystémů, aj.

Ve svém návrhu jsem se zaměřil na využití malých bezpilotních letadel k ochraně letiště před ptactvem. Navržené řešení přispívá ke zvýšení bezpečnosti letového provozu.

Střet letounu s ptákem je vždy provázen rizikem, které v nejhorším případě může mít za následek vážné poškození, či ztrátu kontroly nad letounem. Ochrana letiště bezpilotním letadlem je navržena jako ekonomičtější varianta, ve srovnání se současnými ochrannými prostředky, jako jsou poplašné patrony, či cvičení dravci hlídkující v blízkosti vzletových a přistávacích drah (VPD). Nejedná se však o úplné nahrazení současného zabezpečení, ale pouze o doplnění a zvýšení jeho efektivity. Účelem plašícího zařízení je odehnat ptactvo z prostoru, ve kterém by jejich přítomnost mohla zvýšit riziko střetu s letounem, ale i nenásilné zabránění v hnízdění poblíž letišť.

Předpokladem pro odehnání ptactva je umístění plašícího zařízení na palubu multikoptéry. Nejpoužívanější plašiče jsou světelné a zvukové, popřípadě jejich kombinace. Každý živoch má dorozumívací schopnosti v různém frekvenčním rozsahu. Různé druhy živočichů nejsou schopny poslouchat frekvence jiných živočichů. Pro srovnání, člověk se v tichém prostředí dokáže dorozumívat na vzdálenost až 1 km, sloni se pomocí infrazvukového (nízkofrekvenčního) pásma dokáží dorozumívat na vzdálenost přesahující 5 km. Ptáci využívají ke komunikaci také vysoký kmitočet, jehož násobky leží až v oblasti ultrazvuku, a tedy je pro člověka neslyšitelný. Plašení v obydlených oblastech by probíhalo bez dopadu na životní komfort obyvatel žijících v blízkosti letiště.

Zvukový odpuzovač - plašič ptáků má vestavěnou digitální paměť s uloženými hlasy dravých ptáků, což má účinek na všechny zpěvné ptáky, nebo tísňové, poplašné hlasy stejného ptačího druhu. V nastavitelných intervalech se spouští uložená nahrávka, která se zesílí v zesilovači a prostřednictvím vestavěného reproduktoru se šíří do okolí. Dosah plašiče ptáků se reguluje vestavěným regulátorem hlasitosti.

Přístroje mohou být vybaveny detektorem pohybu, s možností volby slyšitelného zvukového nebo neslyšitelného ultrazvukového plašení a stroboskopickým světlem, vydávajícím intenzivní blikající světlo, které zvyšuje účinky plašení.

Důležitým faktorem je však útlum vlnění při průchodu prostředím. U vysokofrekvenčního vlnění dochází ke značnému útlumu. U ultrazvuku je dosah jen několik desítek metrů, proto je důležité zdroj vlnění umístit do blízkého okolí ptáků. To zajistí schopnost kvadroptéry přemísťovat se podle pokynů řídicí obsluhy.



Obrázek 19. Zvukový plašič BirdXPeller-PRO794 [15]

Na *Obrázku 19* je zobrazen zvukový plašič vysílající v rozsahu 3-5 kHz a s hlasitostí 110 dB. Napájecí proud je 12 V. Plašič vysílá několik typů ptačích zvuků a ty je schopen přehrávat v časové smyčce. Ptáky zvuk vycházející z plašiče rozruší, vnímají jej jako nebezpečí a odlétají z oblasti.

Při monitoringu pohybu ptactva je nejprve nutné rozlišit dvě skupiny ptáků. První skupinou jsou tažní ptáci, kteří migrují dvakrát v roce a jejich trasy jsou téměř bez změny směru. Vědci dodnes neví, jak je možné, že ptáci dokáží udržet stálý směr i na trase několik tisíc kilometrů dlouhé. Pohyb těchto ptáků se tak stává velmi snadno předvídatelným. Do druhé skupiny patří ptactvo, které narušuje ochranné prostory letišť naprosto nepředvídatelně a během celého roku, v hejnech nebo osamoceně.

Pro sledování obou těchto skupin se používají tzv. „ptačí radary“. Na *Obrázku 20* je zobrazen jeden z ptačích radarů značky MERLIN, který je dnes běžně používán po celém světě.



Obrázek 20. Ptačí radar instalovaný na letišti King Abdullah Bin Abdulaziz v Saudské Arábii [16]

Oblast pokrytí tohoto radaru je od povrchu země až do výšky 15000 ft, úhlové pokrytí 360° do vzdálenosti 8 NM. Detekce ptactva je prováděna v reálném čase. Uvedený rozsah a parametry tohoto zařízení dostatečně vyhovují pro použití na téměř všech evropských mezinárodních letištích.

Druhou částí radaru je přenos skenované oblasti na obrazovku obsluhy. Kolem letiště je vytvořena bezpečnostní zóna a podle závažnosti rizika výskytu ptáků jsou zóny rozlišeny barvami na displeji: zelená barva – nízké riziko, žlutá barva – střední riziko a červená barva – vysoké riziko. Když operátor vyhodnotí blížící se riziko, zahájí patřičná nápravná opatření.

Během provozu je nutné nadefinovat v okolí letiště, s respektem k překážkovým rovinám, prostor, který bude pro bezpilotní, plašící letadlo zakázán. Taková situace může nastat v případě pochybení operátora, nebo při poruše řídicího systému bezpilotního letadla. V takovém případě musí být na palubě letadla systém, který bude nezávislý na řízení letadla, a který ukončí let. Pro takový účel lze využít záchranný padák, který vyřadí z funkce autopilota a svou aktivací ukončí let dříve, než dojde k narušení zakázaného prostoru.

Obrazovka operátora bude muset zahrnovat nejen barevně rozlišené nebezpečí narušitele, ale i aktuální polohu bezpilotního letadla. Tuto informaci musí poskytovat i obrazovka patřičného řídicího letového provozu, např. prostřednictvím odpovídáče sekundárního radaru.

Dále je nutné zabezpečit, aby nedošlo ke srážce s překážkou, nebo s jiným provozem, který by se vyskytoval vně zakázané zóny. Pro včasné vyhnutí lze použít ultrazvukových senzorů, pro měření vzdálenosti od překážky. Na *Obrázku 21* je uveden příklad rozmístění měřícího zařízení u kvadrokoptéry. Sensory jsou rozmístěny tak, aby bylo dosaženo pokrytí celého prostoru v okolí kvadrokoptéry. *Obrázek 21* z důvodu přehlednosti nezobrazuje další dva senzory pro měření překážek ve vertikálním směru.

Vzdálenost se měří pomocí ultrazvukového akustického signálu, který je za prahem slyšitelnosti, tedy frekvence vlnění je vyšší než 20 kHz.



Obrázek 21: Uspořádání ultrazvukových senzorů pro měření vzdálenosti

Měřicí senzor se skládá z vysílací a přijímací sondy. Ultrazvukový signál je vyslán vysílací sondou. Pokud se v oblasti pokrytí nachází překážka, vlnění se odrazí a vrací se zpět ke zdroji, do přijímací sondy. Během jednotlivých pulzů je zaznamenáván čas mezi vysláním pulzu a detekcí odraženého signálu. Časová hodnota je pak vyjádřena jako vzdálenost od překážky.

Ultrazvukové senzory mohou pracovat na rozhraní 12C, které bylo popsáno v kapitole autopilota Pixhawk. Výstupní hodnoty ze senzorů jsou zpracovány v procesoru, který vypočítává vzdálenost od překážky a zároveň navrhuje nejoptimálnější řešení vyhnutí se překážce.

Zakročení proti narušiteli ve vzdušném prostoru bude vypadat následovně. Operátor, který bude mít k dispozici aktuální situaci na obrazovce radaru, bude muset objektivně rozhodnout, zda vyslat zakročující letadlo proti potenciální hrozbě, či ne. Druhou možností jak zakročit, je nechat letoun pravidelně prolétávat nad hranicí bezpečnostního prostoru a preventivně vysílat plašivé zvuky. Tento způsob zajistí, že ptactvo nebude hnízdit v blízkosti bezpečnostní zóny. Pokud operátor vyhodnotí situaci s nutným zakročením, vyšle letadlo na požadované místo. Celá trať bude naplánována s ohledem na zakázané prostory a ve výšce, která je potřebná k zásahu. Pokud operátor vyhodnotí, že zásah nebyl úspěšný, změní trať letadla, nebo převezme ruční řízení.

Pro biologickou ochranu letiště lze použít i kvadrokoptéru navrženou v této diplomové práci. Ke stávajícímu zařízení je třeba nainstalovat na palubu kvadrokoptéry plašič s reproduktory. Potřebné napájení je 12 V, to lze dodávat z externí baterie. Dále bude třeba nainstalovat elektronický spínač pro vypnutí/zapnutí plašícího zvuku o vysoké frekvenci.

Environmentální aspekty a dopady ochrany letiště před ptáky využitím cvičených dravců a aspekty navrženého řešení jsou stručně uvedeny v následujícím přehledu (*Tabulka 1*).

Tabulka 1: Přehled environmentálního dopadu na ekosystém letiště

Činnost	Environmentální aspekt	Environmentální dopad
Využívání cvičených dravců	Lov živých ptáků	Usmrcení ptáka, úhyny poraněných ptáků, likvidace chráněných druhů
	Plašení ptáků	Rušení života ptáků
	Výcvik dravce	„Týrání zvířat“
	Chov dravce	Spotřeba přírodních zdrojů Vznik odpadů
Využívání bezpilotních letadel	Hluk stroje, plašícího zařízení	Rušení přirozeného života ptáků
		Rušení přirozené migrace ptáků a přirozených hnízdišť
		Narušení přirozených ekosystémů
	Činnost stroje	Spotřeba přírodních zdrojů Vznik odpadů

Environmentální aspekty ochrany letišť před ptáky jsou nastaveny tak, že negativní environmentální dopady jsou vlastně žádoucí. Záměrem je snižovat negativní dopady na životní prostředí a dospět k vyváženému stavu, kdy ovšem bezpečnost letového provozu bude vždy prioritní. Uplatňuje se tak „princip obecného dobra“, založený na vztahu mezi degradací životního prostředí a lidským zdravím.

Nejdůležitějšími legislativními normy EU v oblasti ochrany přírody jsou Směrnice k ochraně volně žijícího ptactva (79/409/EHS), nejobsažnější Směrnice o přirozených stanovištích (Habitats 92/43/EHS).

V porovnání s ostatními aspekty letecké dopravy jsou však negativní dopady biologické ochrany letišť před ptáky minimální.

4.2 Ochrana perimetru letiště

V návaznosti na předchozí kapitolu zabývající se biologickou ochranou, můžeme stejné zařízení použít i na monitoring perimetru letiště. Pokud bude kvadrokoptéra oblévat letiště po předem naplánované trati nebo v manuálním režimu, obsluha zároveň může prohlížet okolí vestavěnými vizuálními prostředky FPV (First Person View).

Operátor, stejně jako v předchozím případě, bude mít k dispozici manuální nebo automatický režim letu. Nutnou funkcí pro monitoring je získání vizuální reference oblasti, ve které se kvadrokoptéra pohybuje. Takovou funkci umožňuje FPV, které přenáší vizuální obraz v reálném čase. Operátor tak může prohlédnout jakoukoli část chráněné oblasti v požadovaném úhlu pohledu. Možnost přesunu kvadrokoptéry na různé pozice umožňuje prohlédnout oblast daleko pečlivěji, než je tomu u statických bezpečnostních kamer.

Principem FPV je pořizování videozáznamu a jeho přenášení v reálném čase na obrazovku operátora. Záznam se pořizuje kamerou umístěnou na palubě letadla. Záznam je pomocí vysílače přenášen k pozemnímu přijímači. Přijímač signál dekóduje a pošle jej do prohlížeče. Obraz lze promítat na běžných televizorech nebo monitorech.

Videozáznam může být pořizován i termokamerou, kterou lze změřit teplotu objektů s teplotou vyšší, než je absolutní nula. Tímto způsobem lze odhalit i osoby ukrývající se v porostu.

Výhodou proti stacionárním bezpečnostním kamerám je, že lze provádět monitoring s menším počtem kamer a aktivně prohledávat oblasti, které jsou citlivé na vniknutí narušitele, popř. kombinovat se stacionárními kamerami pro zvýšení přehledu situace.

Provozní omezení FPV je v dosahu vysílače od pozemní stanice. Pro přenos obrazu lze využívat vyhrazených frekvencí, jak je uvedeno níže.

910 MHz – nejnižší možná frekvence pro přenos má velkou výhodu, svou poměrně velkou amplitudou umožňuje projít prostředím s překážkami a přenos je možný na větší vzdálenost, za hranicí viditelnosti.

Nevýhodou je, že frekvence 910 MHz čelí značnému šumu. Např. mobilní telefony jsou provozovány v pásmu 900 MHz. Druhou nevýhodou je velikost antén, průměry antén dosahují desítky cm, proto jsou nevhodné pro zamýšlené použití.

1,2/1,3 GHz – tato skupina nabízí velký dosah a nízkou náchylnost vůči šumu. Pro přenos FPV je vhodná, bohužel v České republice je toto pásmo vyhrazené pro leteckou a družicovou radionavigační službu. Pro přenos FPV frekvence nelze využít, neboť by mohlo dojít k narušení letového provozu.

2,3/2,4 GHz – toto pásmo je pro přenos svou rovnováhou dosahu, velikostí antény a nízkou hodnotou šumu nejvhodnější. Nevýhodou je, že toto frekvenční pásmo je velmi často používáno pro přenos mezi pozemní řídicí stanicí a palubním přijímačem. Mohlo by dojít ke ztrátě kontroly nad letadlem

5,8 GHz – Velkou výhodou je malá velikost vysílače, antény a největší počet dostupných kanálů. Nedochozí tak k rušení od ostatních zařízení. Zástavbové rozměry jsou velmi malé a vhodné pro použití v malých letadlech. Nevýhodou je poměrně malý dosah a náchylnost k ztrátě signálu průchodem prostředím, např. i velké vodní kapky mohou pohltit vysílaný signál.

Výběr správné frekvence je samozřejmě důležitý, ale neméně důležitý je i výběr přijímací a vysílací antény. Nejvíce používané jsou antény s lineární nebo cirkulární polarizací. Lineárně polarizované antény jsou nejběžnějším typem a vynikají svou malou velikostí a velkým ziskem. U tohoto typu se často setkáváme s jevem „Multipath Propagation“. Tento jev způsobuje, že přijímací anténa přijímá i odražený signál, který je zpožděný, nebo jinak deformovaný a vnáší do přenosu určitou nejistotu.

Cirkulární antény jsou navrhovány pro přenos vyšších frekvencí, např. 5,8 GHz. Vynikají dobrým dosahem a čistotou přijímaného signálu. Další antény, které jsou svými vlastnostmi podobné cirkulárním anténám, jsou antény Helix (nebo šroubovicové). Tento druh je velmi náročný na výrobu a je třeba každé zařízení správně naladit, aby bylo dosaženo maximální účinnosti.

Pravidelným skenováním perimetru letiště bude zajištěn dostatečný monitoring pro doplnění statických bezpečnostních kamer. Pokud operátor objeví narušitele, kontaktuje bezpečnostní složky a ty proti narušiteli patřičně zakročí. Obě možnosti využití, biologická ochrana a monitoring letiště je možné kombinovat. Postačí vybavit multikoptéru patřičným vybavením pro oba účely.

Kvadroptéru navrženou v této diplomové práci lze jednoduchým způsobem upravit tak, aby ji bylo možné použít k účelům popsaným výše. Záznamové zařízení, kamera GoPro, má možnost výstupu videosignálu AV, který lze přenášet vysílačem k pozemní stanici. Na *Obrázku 22* je schéma zapojení palubní - vysílací a pozemní - přijímací části FPV zařízení.

Pro uvedený příklad schématu bylo zvoleno FPV značky Boscam. Základní parametry tohoto zařízení:

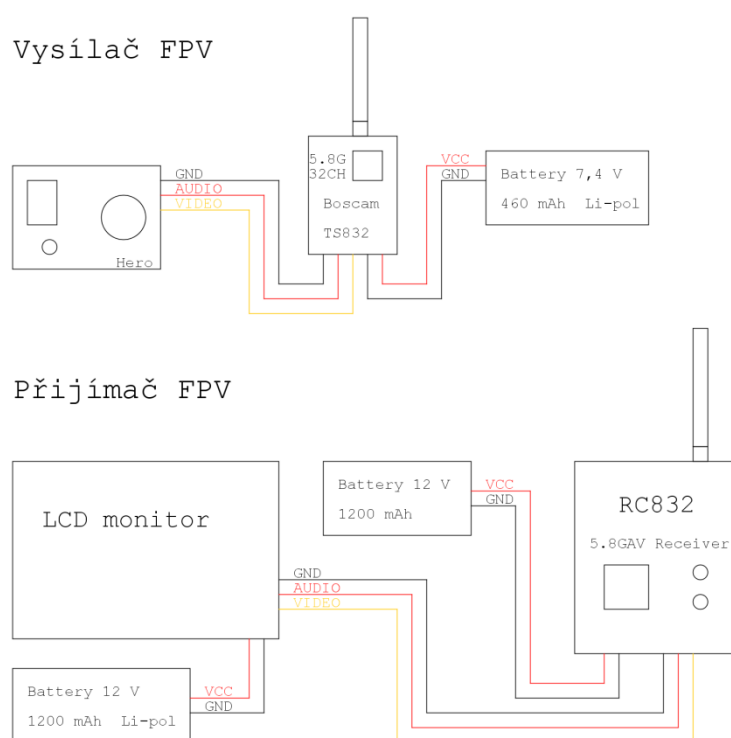
Vysílač TS832:

- Napájecí napětí: 7,4 – 16 V (ve schématu je použita 3 článková Li-Pol baterie o napětí 11,1V)
- Výkon vysílače: 600 mW

- Hmotnost: 21 g
- Rozměry: 54 x 32 x 10 mm

Přijímač RC832:

- Napájecí napětí: 12V
- Video formát: NTSC/PAL
- Rozměry: 80 x 65 x 15 mm
- Hmotnost: 85 g



Obrázek 22: Schéma zapojení FPV Boscam

4.3 Využití bezpilotních prostředků v zemědělství

Předchozí dvě možnosti využití bezpilotních prostředků byly zaměřené na zvýšení bezpečnosti v oblasti letectví. Existuje mnoho dalších využití i v jiných odvětvích průmyslu. Například v zemědělství za použití technologie bezpilotních prostředků je navrhována výsadba až jedné miliardy stromů ročně, ve snaze bojovat proti masivní úrovni odlesňování,

kteřá ovlivnila velkou část světových džunglí a lešů. Obecně zemědělství je část průmyslu, kteřá je velmi závislá na počasí, klimatických podmínkách, na rozloze obdělávané půdy atd. Výnosy jsou závislé na ochraně proti škůdcům, kteří při masivním napadení mohou způsobit znehodnocení části nebo i celé úrody.

Velmi významný je problém ochrany polí s vinnou révou. Vinice jsou každoročně napadány špačkem obecným, který přilétá ve velkých hejnech čítajících až stovky kusů a ničí úrodu hroznů. Špaček obecný, latinským názvem *Sturnus vulgarit*, z čeledi špačkovitých, je však chráněným druhem. V Evropě je špaček obecný řazen mezi ubývající druh (v letech 2001 - 2003 u nás hnízilo 0,9-1,8 milionu párů). Při odhánění škůdce se podle zákona o myslivosti nesmí používat takových prostředků, které by vedly ke zranění škůdců. Usmrcování špačka obecného za účelem plašení je tedy zakázáno. Pro odehnání hejn špačků z vinic je používáno poplašných akustických signálů vystřelovaných z děl nebo ze střelných zbraní. Akustické plašiče, které byly popsány v kapitole 4.1, lze použít jen v omezeném prostoru. Dosah takovýchto plašičů jsou řádově desítky metrů. Využití na polích o velkých rozlohách je z důvodů jejich vysoké pořizovací ceně neekonomické.

Použití multikoptér, popsané v kapitole 4.1, je totožné jako při biologické ochraně letišť. Multikoptéra vybavená akustickým i vizuálním plašičem by přelétávala nad polem v pravidelných intervalech, nebo by byla řízena operátorem, který by vizuálně ohledal pole a podle potřeby manuálně navedl na místo napadené škůdci.

5. Podmínky certifikace pro malá bezpilotní letadla

Pohybujeme-li se v evropském měřítku, nelze sjednotit veškerou platnou legislativu týkající se provozu bezpilotních letadel do jednotného přehledu. Mezinárodní organizace pro civilní letectví ICAO rozhodla, že legislativa pro bezpilotní letadla s maximální vzletovou hmotností nižší než 150 kg bude řešena na národní úrovni. Každý stát si tedy vytvoří legislativu podle svého uvážení a zkušeností. Toto rozhodnutí se rozhodla podpořit i Agentura pro bezpečnost letectví EASA.

Legislativní rozdíly mezi jednotlivými státy značně komplikují provoz bezpilotních letadel na území jiném, než na území státu, kde proběhl zápis do leteckého rejstříku.

5.1 Legislativní dokumenty platné pro provoz bezpilotních letadel v ČR

V České republice je provozování bezpilotních letadel řízeno těmito normami:

- **Předpis č. 49/1997 Sb.** - Zákon o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů.
§52 – Létání letadel bez pilota. „*Letadlo způsobilé létat bez pilota může létat nad územím České republiky jen na základě povolení vydaného Úřadem a za podmínek v tomto povolení stanovených. Úřad povolení vydá, nebudou-li ohroženy bezpečnost létání ve vzdušném prostoru, stavby a osoby na zemi a životní prostředí.*“ [4]
- **Letecké předpisy uveřejňované Ministerstvem dopravy ČR:** Předpis L2 . Pravidla létání, platný pro letadla s pilotem i bez pilota na palubě. Vydaný Úřadem pro civilní letectví v České republice. Zejména pak dodatek 4 – Systémy dálkově řízeného letadla (pokud se jedná o volné balóny bez pilota na palubě se zátěží – dodatek 5. Podmínky pro provoz balónů bez pilota na palubě – doplněk R) a doplněk X – Bepilotní systémy.
Předpis L7 – Poznávací značky letadel

Předpis L13 – Letecký předpis o odborném zjišťování příčin leteckých nehod a incidentů

- **Směrnice ÚCL: CAA/S-SLS-010-n/2012** - Postupy pro vydání povolení k létání letadla bez pilota. Novela směrnice obsahující pokyny k vyplnění žádosti a k celkové aktualizaci postupů pro provedení evidence a vydání patřičného povolení.
CAA/F-SLS-027-n/2012 – Žádost o evidenci pilota, letadla bez pilota a povolení k létání
- **CAA/F-SLS-048-0/2014** - Žádost o změnu evidence pilota a povolení k létání bezpilotního letadla - odstranění žakovských omezení
- **Vyhláška č. 108/1997 Sb.** - Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů, o civilním letectví a o živnostenském podnikání (živnostenský zákon) – tato vyhláška se zabývá vykonáváním leteckých prací
- **Zákon č. 634/2004 Sb.** - Zákon o správních poplatcích
- **Sportovní řád FAI** – Část 4 – Letecké modelářství. Platné pro mezinárodní sportovní akce, podle pravidel Sportovního řádu.

Provoz bezpilotních prostředků v nesouladu s uvedenými předpisy může být pokutován až do výše 5 000 000 Kč ze strany Úřadu pro civilní letectví.

5.2 Postup certifikace pro navržené bezpilotní letadlo

Způsob certifikace bezpilotního zařízení je závislý na charakteru jeho využití. Pokud je zařízení využíváno pro sportovní a rekreační účely a jeho hmotnost je nižší než 20 kg (model letadla), certifikace není nutná. Pokud hmotnost přesáhne zmíněných 20 kg, nebo pokud účel provozu letadla je za úplatu, poté je certifikace nutná (bepilotní letadlo).

Celý postup můžeme rozdělit do dvou následujících skupin: Získání povolení k létání a získání povolení pro provoz za úplatu.

Celý proces, jak postupovat při certifikaci bezpilotního letadla, je zveřejněn na webových stránkách ÚCL, zde jsou uvedeny pouze přílohy, nutné při předložení formuláře.

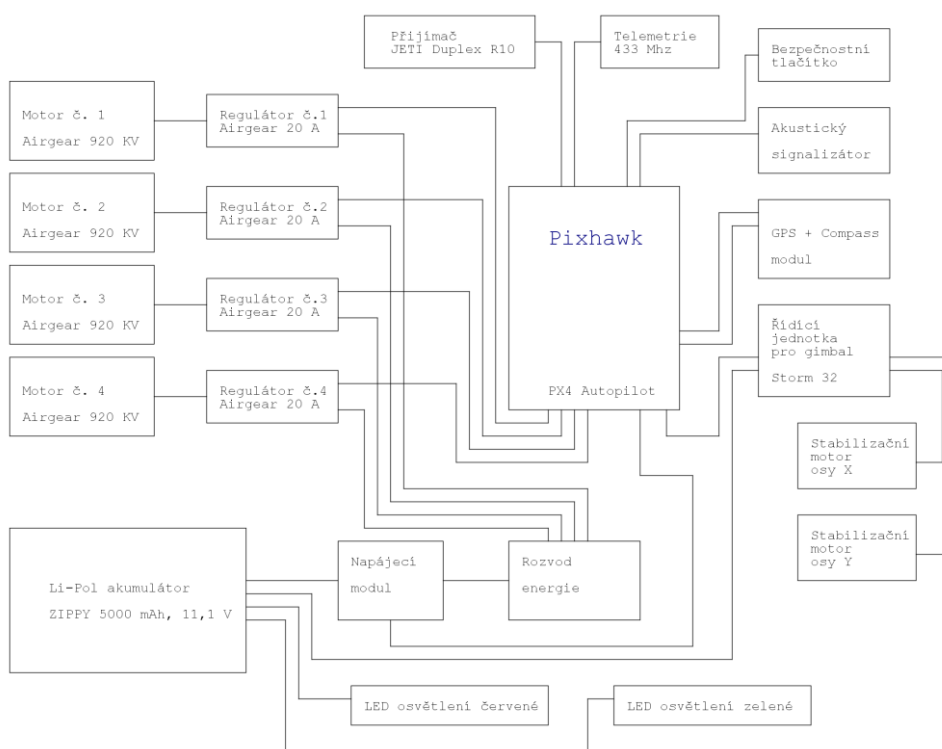
5.2.1 Získání povolení k létání (nutné pro provoz letadla za úplatu)

- a) Žádost je podávána formou vyplněného formuláře a to včetně veškerých příloh.
- Barevná fotografie. Musí být pořízena šikmo zepředu a z boku, jako je tomu na *Obrázku 23*.



Obrázek 23: Fotografie kvadrokoptéry vlastní konstrukce

- Blokové schéma zapojení elektroinstalace s popisem jednotlivých částí, ze kterého musí být možné vyhodnotit způsob zapojení jednotlivých prvků. Pro náš případ je uvedeno na *Obrázku 24*.
- Bezpečnostní dokumentace, obsahující alespoň řešení nouzových postupů v případě:
 - poruchy řízení (poruchy jednotlivých servomotorů)
 - vysazení motoru (ztráta výkonu motoru/-ů)
 - problému s akumulátorem
 - selhání řídicího a kontrolního datového spoje (popis funkce bezpečnostních „failsafe“ systémů)



Obrázek 24: Blokové schéma elektroinstalace

- Provozní příručka - Provozovatel je povinen zpracovat provozní příručku, která se skládá z těchto bodů:
 - Část A – Obecná ustanovení
 - Část B – Provoz letadel
 - Část C – Směrnice pro jednotlivé druhy leteckých prací
 - Část D – požadavky pro výcvik a kvalifikace personálu organizace
 - Část E – Postupy pro údržbu
 - Část F – Bezpečnostní postupy
- Kopie osvědčení o uzavřeném pojištění odpovědnosti z provozu UA.

V současné době, pojišťovna, která poskytuje tento druh pojištění, je pouze jedna a to pojišťovna Allianz. V *Tabulce 2* jsou uvedeny ceny dle platného ceníku služeb pro pojištění bezpilotních letadel. Pojištění letadla s vzletovou hmotností nad 20 kg se sjednává individuálně, tzn. cena pojistného je taktéž individuální.

Tabulka 2: Nabízené pojištění pojišťovny Allianz [35]

Využití	Území	Výše plnění pojistného [Kč]	Cena pojistného na 1 rok [Kč]
Soukromé a rekreační účely	Evropa	1 000 000	1 260
Soukromé a rekreační účely	Evropa	2 000 000	1 890
Soukromé a rekreační účely	Evropa	3 000 000	2 520
Soukromé a rekreační účely	Evropa	24 700 000	7 056
Letecké práce	CZ + SK	24 700 000	7 840
Letecké práce	Evropa	24 700 000	9 800

- Postupy zajišťující bezpečnost UAS (ochrana před protiprávními činy). Popis jakým způsobem jsou UAS zabezpečeny proti protiprávnímu zneužití ve vzduchu i na zemi. Např. zabránění volnému přístupu cizích osob, nebo úmyslné převzetí kontroly nad letadlem - rušením datového spoje. Pokud provozovatel zpracovává provozní příručku, postupy zajišťující bezpečnost jsou obsaženy v části F.
- Doklady o vlastnictví. Postačí kopie kupní smlouvy. Pokud je konstrukce vlastní výroby, tak čestné prohlášení o vlastnictví.

- b) Ze strany úřadu dojde k vyhodnocení podaných dokumentů
- c) Při podání vyplněného formuláře je žadatel povinen zaplatit správní poplatek, který činí 4000 Kč
- d) Úřad poté rozhodne o vydání žadateli Povolení k létání letadla bez pilota na palubě s omezením: „pilot – žák“
- e) Podání žádosti o změnu povolení – odstranění omezení „pilot – žák“
- f) Kontrola funkce systémů letadla a přezkoušení z teoretických znalostí pilota
- g) Výzva k zaplacení správního poplatku 400 Kč
- h) Rozhodnutí úřadu o vydání, nebo nevydání povolení k létání bez pilota na palubě

5.2.2 získání povolení pro provoz za úplatu

a) Opět je žádost podávána formou formuláře s přílohami a s charakteristickým účelem použití. Bezpilotní letadlo lze použít pro letecké práce LP, nebo pro letecké práce pro vlastní potřebu LČPVP. Přílohy zahrnují:

- Doklady o existenci podnikatelského subjektu žadatele
- Prohlášení o nepřidělení IČ
- Doklady o odborné praxi
- Doklady o dosaženém vzdělání
- Doklady a rozsah zmocnění
- Výpisy z rejstříku trestů všech uvedených osob
- Podnikatelský plán – údaje o rozsahu a četnosti zamýšlených druhů leteckých prací (LČPVP nezahrnuje)
- Prohlášení o finanční způsobilosti žadatele (LČPVP nezahrnuje)
- Provozní příručka (LČPVP nezahrnuje)
- Letový park
- Přehled dálkově řídicích pilotů

Letecké činnosti pro vlastní potřebu ještě dále vyžadují:

- Směrnice pro jednotlivé druhy leteckých činností
- Doklad o zajištění bezpečnosti provozování leteckých činností před protiprávními činy
- Postupy pro údržbu

b) Ze strany úřadu dojde k vyhodnocení podaných dokumentů

c) Při podání vyplněného formuláře je žadatel povinen zaplatit správní poplatek, který činí 10000 Kč

d) Rozhodnutí o vydání, nebo nevydání povolení

Z obou zde uvedených hlavních částí certifikace vyplývá legislativní požadavek, kdy úřad schvaluje pro provoz pilota a příslušné bezpilotní letadlo. Pilot tak získá povolení k létání pouze s typem bezpilotního letadla, se kterým vykonal certifikaci. Pilotní kvalifikace ho neopravňuje pilotovat jiné letadlo. V případě, že pilot chce svou kvalifikaci rozšířit o další typ bezpilotního letadla, musí znovu předvést své pilotní zkušenosti před zkušební komisí. Povolení k létání a k povolení pro provoz za úplatu je vydáváno na dva roky.

5.3 Certifikace bezpilotního letadla pro sportovní a rekreační účely

Pro příklad porovnání dvou možných způsobů provozu zde uvedu rozdíly mezi procesem pro certifikaci bezpilotního letadla určeného pro LP, nebo LČPVP a bezpilotního letadla pro sportovní a rekreační účely (model letadla s maximální vzletovou hmotností přesahující 20 kg). Certifikace je nutná v případě sportovního a rekreačního použití, ale s maximální vzletovou hmotností nad 20 kg. Na tento druh provozu se vztahuje pouze certifikace v rámci získání povolení k létání pro pilota a pro letadlo. Hlavní rozdíly spočívají v osvobození od některých požadavků.

- a) Žádost je podávána formou vyplněného formuláře a to včetně veškerých příloh.
- Barevná fotografie UA
 - Blokové schéma zapojení palubní elektroinstalace s popisem jednotlivých částí
 - Bezpečnostní dokumentace obsahující alespoň řešení nouzových postupů v případě:
 - Poruchy řízení (poruchy jednotlivých servomotorů)
 - Vysazení motoru (ztráta výkonu)
 - Problém s akumulátorem
 - Selhání řídicího a kontrolního datového spoje
 - Kopie osvědčení o uzavření pojištění odpovědnosti z provozu UA
 - Postupy zajišťující bezpečnost UAS (ochrana před protiprávními činy)
 - Doklad o vlastnictví UAS

Další postup certifikace je totožný, jako v případě získání povolení k létání pro jiné než rekreační účely. Správní poplatek za vyřízení (bod c) činí 2000 Kč a poplatek (bod g) činí 200 Kč. Povolení je opět vydávané s platností dva roky.

5.4 Letecká veřejná vystoupení

Letecká veřejná vystoupení je specifický druh provozu, který se ve většině případů týká spíše provozů modelů letadel, nelze však opomenout i provoz bezpilotních letadel. Ta mohou například během vystoupení pořizovat záznam vystoupení jiných modelů letadel. Při větší koncentraci letadel za účelem jejich předvedení divákům je třeba dbát zvýšených bezpečnostních předpisů. Seznam požadavků je uveden ve směrnici CAA/S-SLS-015-n/2012

vydané Úřadem pro civilní letectví. Tato směrnice se týká pouze veřejných leteckých vystoupení modelů letadel, která mají maximální vzletovou hmotnost vyšší než 20 kg.

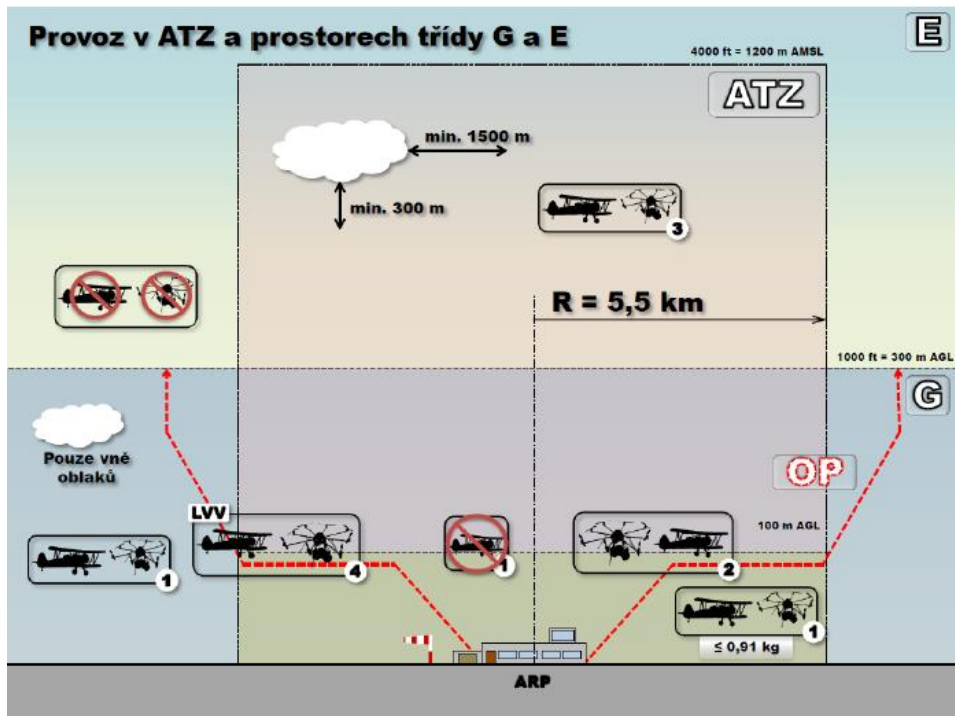
5.5 Prostor vyhrazený pro provoz bezpilotních letadel a modelů letadel

Provoz bezpilotních prostředků je schválený ve vzdušném prostoru třídy G, který je na *Obrázku 25* znázorněn modrou barvou. Tento prostor sahá od povrchu země do výšky 300 m, tedy kopíruje zemský povrch.

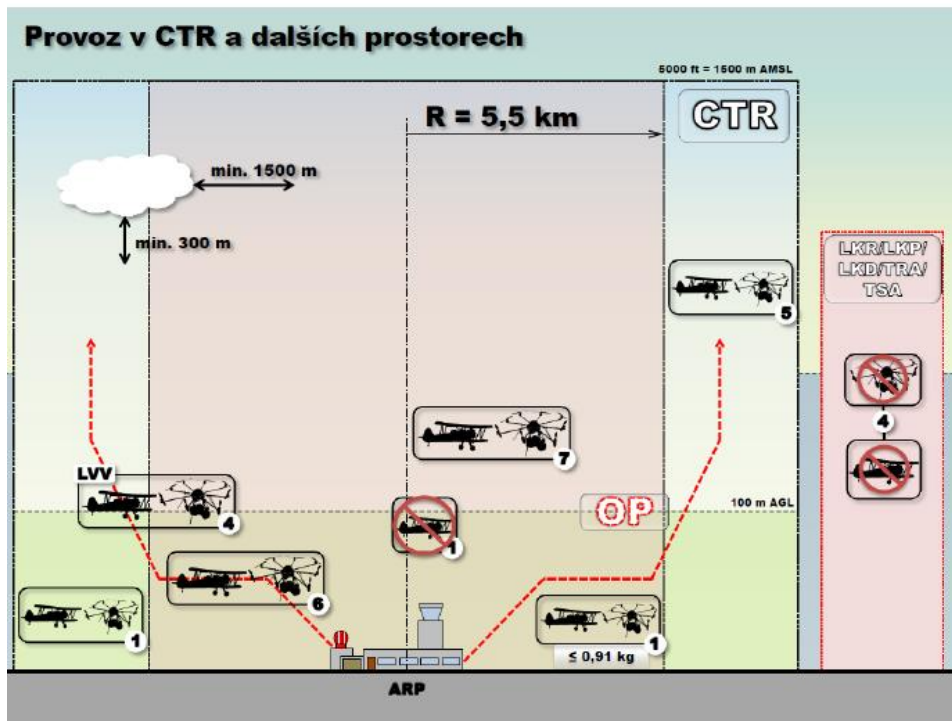
Vzdušné prostory v rámci letištní provozní zóny ATZ (na *Obrázku 25* je znázorněn červenou barvou) nachází se v blízkosti neřízených letišť. Uvnitř těchto prostorů není poskytována služba řízení letového provozu. Prostor je horizontálně vymezen kružnicí o poloměru 5,5 km od vztažného bodu letiště a sahá do výšky 4000 ft (1200 m). Pokud je na daném letišti poskytována služba AFIS, je nutné splňovat požadavky, které si určí majitel nebo provozovatel letiště. Není-li poskytována služba AFIS, platí stejné podmínky jako v prostoru třídy G, tedy provoz v maximální výšce 300 m. Modely s maximální vzletovou hmotností nižší než 0,91 kg mají omezenou maximální výšku na 100 m nad zemí. Mohou však létat v ATZ i bez koordinace, mimo ochranná pásma letišť.

Provoz bezpilotních letadel nesmí být prováděn v zakázaných, nebezpečných a jiným uživatelem aktivovaných omezených, dočasně rezervovaných a dočasně vyhrazených prostorech (TSA a TRA), pokud ÚCL nepovolí jinak.

Na *Obrázku 25* je zobrazen prostor třídy G, E a zóna ATZ, ze kterého je patrné, kde se bezpilotní letadla mohou pohybovat.



Obrázek 25: Využitelné prostory pro provoz bezpilotních letadel a modelů letadel v prostorech tříd G, E a ATZ [34]



Obrázek 26: Využitelné prostory pro provoz bezpilotních letadel a modelů letadel v zóně CTR a v dalších prostorech [34]

Obrázek 26 zobrazuje prostory zóny CTR v jeho blízkosti a prostory, kde provoz není povolen. Zóna CTR je řízený okresek a v ČR prostor třídy D s řízeným provozem. Horizontální hranice nemá přesně definovaný tvar a záleží na charakteru letiště, nejméně však ve vzdálenosti 9,3 km od vztažného bodu letiště. Spodní hranici tvoří zemský povrch a vrchní hranice je obecně 5000 ft (1500 m). Let může být uskutečněn ve vzdálenosti minimálně 5,5 km od vztažného bodu letiště a v maximální výšce 100 m, nebo v jiné výšce, pokud řízení letové provozu rozhodne jinak (koordinální dohoda). Ve vzdálenosti menší, než je 5,5 km lze létat pouze s povolením Úřadu pro civilní letectví.

Malá bezpilotní letadla, která mají maximální vzletovou hmotnost nižší než 0,91 kg mohou létat i v menší vzdálenosti, ale pouze do výšky 100 m nad zemí a mimo ochranná pásma letiště.

V prostorech MCTR – vojenský řízený okresek jsou podmínky pro provoz totožné jako v zóně CTR.

V obou případech platí, že nad 300 m (1000 ft, *Obrázek 25*) a nad 100 m (300ft, *Obrázek 26*) musí být dodržena požadovaná vzdálenost od oblačnosti. Horizontální vzdálenost je minimálně 1500 m a vertikálně 300 m. Pod definovanou hranicí pro oba případy stačí, aby byl let prováděn vně oblak.

Další omezení jsou obsažena v Doplnku X ustanovení 8, předpisu L2. Zde je uvedeno, že je létání zakázáno v ochranných pásmech nadzemních dopravních staveb, nadzemních inženýrských sítí, nadzemních telekomunikačních sítí, uvnitř chráněných území, v okolí vodních zdrojů a objektů důležitých pro obranu státu.

Bezpilotní letadlo nesmí být použito pro účely přepravy nebezpečných látek, nebo shazování nákladu za letu (vyjma leteckých soutěží, veřejných vystoupení, nebo provozních náplní). Během letu pilot bezpilotního letadla nesmí být přepravován na kterémkoli technickém prostředku.

V *Tabulce 3* je uveden výčet omezení provozu pro kvadrokoptéru navrženou v této práci. Omezení je uvedeno v leteckém předpisu L2, doplnku X, který blíže specifikuje vlastnosti bezpilotních letadel, potřebné k jejich provozu. Z této tabulky lze kvadrokoptéře přiřadit následující omezení provozu:

Tabulka 3: Omezení provozu kvadrokoptéry o hmotnostním rozmezí od 0,91 kg do 7 kg

	Rekreačně sportovní	Výdělečné, experimentální, výzkumné
Evidence letadla v leteckém rejstříku	ne	ano
Evidence pilota	ne	ano
Praktický a teoretický test pilota	ne	ano
Povolení k létání	ne	ano
Povolení k provádění LP a LČPVP	nelze	ano
Označení UA: ID štítek / ID štítek + pozn. Značka	ano / ne	ano/ano
Min. ve vzdálenosti (m): vzlet, přistání/osoby, stavby / osídlený prostor	bezpečná	bezpečná
Pojištění: bezpečný provoz/LVV (mil. Kč)	ne / 1	dle nařízení č. 785/2004
Dozor	ne	ne
"Fail safe" systém	ano	ano
Provozní příručka UAS	ne	ano
Hlášení událostí	ne	ano

Důležitým legislativním omezením, které udává předpis L2, je provoz bezpilotních prostředků pouze při udržování vizuálního kontaktu VLOS (Visual Line Of Sight) s bezpilotním prostředkem. Pilot tedy nesmí provádět let, aniž by neměl vizuální referenci s letadlem, bez použití pomůcek, které by zvyšovaly dohled pilota. Nelze tedy létat v mlze, v mracích, nebo za překážkami. Let prováděný v podmínkách nesplňující vizuální referenci je považován za BVLOS (Beyond Visual Line Of Sight) a česká legislativa jej neumožňuje. V předchozí kapitole je popsán systém přenosu obrazu v reálném čase FPV. Tento systém z legislativního pohledu nelze použít jako primární prostředek vizuální referenci. Poslední způsob provozu, který kombinuje oba předchozí případy je EVLOS (Extended Visual Line Of Sight). K řízení letu je potřeba dvou pilotů. První pilot k vizuální referenci používá prostředky jako např. FPV

a provádí let. Druhý pilot musí udržovat vizuální referenci s letadlem a v případě ztráty orientace prvního pilota být připraven kdykoli během letu převzít řízení letadla.

5.5.1 Legenda k Obrázkům 1 a 2 [34]:



Modely letadel s maximální vzletovou hmotností do 20 kg



Bezpilotní letadla (včetně modelů letadel s maximální vzletovou hmotností přesahující 20 kg)

- 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 Úřadu pro civilní letectví (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.

5.6 Legislativní rozdíly provozu bezpilotních letadel v evropských a mimoevropských zemí

5.6.1 Legislativní požadavky vybraných evropských států

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, neplatí pro evropské státy jednotná legislativa. Rozdíly v legislativě pro provoz bezpilotních letadel pro civilní použití v jednotlivých evropských i mimoevropských zemích řeší tato kapitola.

Základním požadavkem pro všechny evropské státy je omezení maximální vzletové hmotnosti. Jak již bylo řečeno, každý evropský stát musí vytvořit platnou legislativu pro bezpilotní letadla. Pokud ale přesahuje maximální vzletová hmotnost bezpilotního letadla 150 kg, pak regulace spadá pro evropskou agenturu pro bezpečnost – EASA. Proto se touto kategorií nabudu dále zabývat.

Německo

Spolková republika Německo je poměrně specifický příklad evropského měřítka. Německý letecký úřad LBA (Luftfahrt-Bundesamt) vypracoval legislativu, která je společná pro všechny spolkové země. Jednotlivé země pak mají vlastní upřesňující požadavky.

Mezi společné požadavky patří:

- Maximální vzletová hmotnost je omezena na 25 kg. Pokud je překročena tato hmotnost, pro provoz je třeba získat speciální povolení.
- Celý let musí být prováděn za přímého dohledu pilota.
- Maximální nadmořská výška letu nesmí překročit 100 m.
- Létání je striktně zakázáno nad lidmi, nad zastavěnými oblastmi.
- Každý UAV se stává součástí leteckého provozu. V oblasti provozu se musí vyhnout a umožnit let policejním a záchranným složkám.
- Pro certifikaci UAV jsou požadované takřka totožné požadavky, jaké jsou potřebné pro certifikaci v ČR. Mezi požadavky patří: informace o žadateli, účel provozu UAS, informace o UAS a doklad o uzavření pojištění.

Provoz za účelem jiným, než rekreačním a sportovním, musí být předem schválen vlastníkem pozemku, nad kterým bude prováděn let. Dále pak musí být let předem schválen od příslušného leteckého úřadu, spolu s informacemi o předpokládané době letu a výškou, ve které bude let prováděn.

Anglie

Vytvořené zákony pro provoz UAV jsou popsány v dokumentu CAP 772 vydaným leteckým úřadem Velké Británie.

Rozdělení dle hmotnostních kategorií je velmi podobné jako v ČR:

SUA (Small Unmanned Aircraft)	0-20 kg
Light UAS (Unmanned Aircraft System)	20 – 150 kg
UAS (Unmanned Aircraft System)	nad 150 kg

Přístup CAA je rozdělit UAS dle činností, které budou vykonávat. Dělení je do tří kategorií: A, B a C. Do jaké kategorie UAV spadá, záleží na tom, jak sofistikovaný systém je použit (např. počet používaných režimů letu), v jakém prostředí se letadlo pohybuje (např. dodržování dráhy letu v letovém prostoru) a na maximální vzletové hmotnosti.

Pro letecké práce jsou stanoveny následující požadavky: SUA – maximální vzletová hmotnost letadla je pod 20 kg. Pro tuto třídu, pokud provádí letecké práce, nebo je provozována třetí stranou, se nevztahuje proces certifikace. Je ale nutné, aby po celou dobu provozu měl pilot vizuální kontakt s letadlem. Maximální výška, kterou může letadlo dosáhnout, je 400 ft (přibližně 120 m) a vzdálenost od pilota nesmí být větší, než 500 m. Pokud letadlo slouží výhradně pro sportovní a rekreační účely, nevztahuje se na něj nutnost certifikace k získání povolení k létání. Chceme-li provozovat letadlo, ať už pro letecké práce, či pro rekreační a sportovní účely, vztahují se na něj všeobecné požadavky. Mezi nejdůležitější patří, že létání v oblastech se zástavbou, nebo v oblastech nad shromážděním většího počtu osob není povoleno.

Pro kategorii „Light UAS“ jsou nároky na požadavky vyšší. Veškerá letadla jsou předmětem povolení k létání, popř. povolení k provádění leteckých prací. Technické požadavky jsou rovněž přísněji hodnocené, zejména: konstrukce letadla, použité konstrukční prvky, prvky pro zachování bezpečného provozu a prokázání schopnosti pilota v řízení letadla. Všechny tyto požadavky jsou zahrnuty do UAS OSC dokumentu (Safety Case Type Report).

5.6.2 Legislativní požadavky pro provoz bezpilotních letadel v Austrálii a USA

Austrálie

Systém rozdělení letadel v Austrálii leteckým úřadem CASA je odlišný od předchozích příkladů. Primární dělení je na dálkově řízená letadla (RPA) a modely letadel. RPA jsou všechna letadla, která jsou používána pro obchodní, vládní, nebo výzkumné účely. Model letadla je pak určen pouze pro rekreační a sportovní použití.

Pro provoz RPA je zapotřebí, aby piloti měli dostatečné znalosti v oblasti letectví, v souladu s pilotní kvalifikací soukromého pilota, stejně jako dostatečné dovednosti s létáním s těmito letadly. Mezi další potřebné kvalifikace patří i radiotelefonní zkoušky. Provoz UAV je pak schválen pouze v neosídlených oblastech do výšky 400 ft (120 m) nad úrovní terénu. Let ve vyšších výškách je možný pouze po schválení leteckým úřadem. Maximální vzletová

hmotnost je 25 kg. Mezi největšími odchylkami od již zmíněných příkladů patří provoz v meteorologických podmínkách VMC, ale i IMC (s příslušným schválením).

Provoz modelů letadel je z pohledu legislativy méně složitější než provoz RPA. Pro provoz modelů pilot nemusí být vlastníkem žádné kvalifikace, ale musí být seznámen se základními pravidly létání. Mezi základní pravidla patří, že model smí být provozován pouze v přímé viditelnosti pilota bez použití jiných prostředků (vyjma brýlí) a v meteorologických podmínkách VMC. Noční létání, létání v mracích či mlze není povoleno. Létání v hustě zalidněných oblastech, jako jsou pláže, parky apod. je zakázáno. Model letadla nesmí být provozován ve větší výšce než 400 ft (120 m) nad terénem a v menší vzdálenosti od letiště než je 5,5 km. Každý pilot musí být registrován v letecké asociaci pro piloty modelů letadel MAAA (Model Aeronautical Association of Australia). V současné době je zde zaregistrováno více než 11 000 pilotů. Provoz modelů s maximální vzletovou hmotností přesahující 25 kg je možný, ale vztahuje se na něj rozšířená legislativa spravovaná MAAA.

Spojené státy americké

Pohled na bezpilotní systémy ze strany leteckého úřadu FAA (Federal Aviation Administration) je naprosto odlišný od letadel s posádkou na palubě. Za tímto účelem bylo vytvořeno zvláštní odvětví, do kterého spadají bezpilotní prostředky. Americká legislativa je rozděluje na tři druhy podle určení: veřejný provoz, civilní provoz a provoz modelů letadel.

Poslední jmenovaný provoz modelů letadel je velmi obdobný, jako v předcházejících případech. Účel využití modelů letadel je pouze pro rekreační a sportovní použití. Maximální vzletová hmotnost nesmí překročit hmotnost 55 liber (25 kg). Během provozu letadlo nesmí překročit výšku 400 ft (120 m) a musí být v dostatečné vzdálenosti od překážek. Během celého letu musí být udržován vizuální kontakt mezi pilotem a letadlem. Provoz v okolí letišť je povolen ve vzdálenosti 5 mil (9,5 km) od letiště. Let se smí uskutečnit pouze v dostatečné vzdálenosti od osob a od zástavby. Provoz v takto definovaných podmínkách nevyžaduje žádné zvláštní povolení. Naopak provoz mimo podmínky vyžaduje povolení od úřadu FAA, tedy pro provoz za jiným účelem, než jsou rekreační a sportovní účely.

Civilní provoz zahrnuje veškeré vládní operace. Provoz bezpilotních prostředků požaduje získat osvědčení COA (Certificate of Waiver or Authorization), které se vydává s platností dva roky. S tímto osvědčením může provozovatel nebo organizace provozovat bezpilotní letadlo za daným účelem. COA vyhrazuje část vzdušného prostoru, ve kterém se může pohybovat za dodržení bezpečnostních požadavků. Cílem COA je vydat osvědčení, které by splňovalo bezpečnostní požadavky na stejné úrovni, jako je tomu u letadel s posádkou na

palubě. V praktickém důsledku to znamená, že je třeba bezpilotní letadlo držet v dostatečné vzdálenosti od obydlených oblastí a od ostatního vzdušného provozu. Držiteli COA certifikátu musí být veškeré záchranné složky, celní správa, provozní mise vlády, či pro výzkumné účely.

Poslední kategorie je civilní využití bezpilotních letadel, které nezahrnuje vládní operace. Jedná se o povolení pro provoz bezpilotních letadel za úplatu, tedy obchodní činnost. Pro provoz je nutné získat povolení od FAA. Letecký úřad FAA registruje piloty i bezpilotní letadla. K získání povolení k létání je žadatel o pilotní kvalifikace nucen složit zkoušku z všeobecných teoretických znalostí. Test musí být úspěšně složen každých 24 měsíců a minimální věk žadatele je sedmnáct let. Další základní podmínkou je absolvovat prověření od bezpečnostní agentury amerického ministerstva pro vnitřní bezpečnost TSA (Transportation Security Administration). Požadavky týkající se provozu bezpilotního letadla jsou totožné s modelem letadla. Zde jsou uvedeny pouze největší rozdíly: maximální výšková hranice, kterou lze dosáhnout, je 500 ft (150 m), to je o sto stop výše (30 m); provádět let nad osobami nezapojených do letového provozu je možné pouze v prostoru třídy G a s patřičným povolením; provádění letu v prostoru třídy G je možné bez povolení, pro prostory B, C, D a E musí být schválen příslušným stanovištěm ATC. Během celého letu musí pilot udržovat vizuální kontakt s bezpilotním letadlem. Systémy typu First-Person-View jsou povoleny pouze, pokud je do provozu zařízení zapojen pozorovatel, který v nutném případě převezme řízení.

Provoz bezpilotních letadel těžších než 55 liber je v současné době ponechán na legislativě jednotlivých států. Do budoucna se očekává i regulace této kategorie.

5.7 Šetření leteckých nehod a incidentů

Šetření leteckých nehod a incidentů zajišťuje Úřad pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod ÚZPLN. Šetření probíhá pouze pro bezpilotní letadla. V současné době jsou zaznamenány dva případy letecké nehody bezpilotního letadla.

K prvnímu případu letecké nehody bezpilotního prostředku došlo 12. 3. 2014. Šlo o zřícení bezpilotního letadla MK Hexa XL poblíž brněnského hřbitova. Jednalo se o hexakoptéru s maximální vzletovou hmotností 3,7 kg určenou pro snímkování. Ve výšce šedesáti metrů došlo k chybovému hlášení telemetrie mezi řídicí jednotkou UAV a regulátorem otáček. Pilot zaznamenal ztrátu výkonu a zastavení motoru číslo dva. Ihned zahájil nouzové klesání a

následné nouzové přistání. Při klesání došlo ke ztrátě kontroly nad letadlem, což vedlo ke zřícení. Při dopadu došlo k rozlámání konstrukce hexakoptéry a poničení záznamového zařízení. Při nehodě nebyl nikdo zraněn. Ke druhému případu došlo 19. 12. 2014 na Sobínce, kdy havarovala multikoptéra vlivem námrazy, která vznikla za letu na vrtulových listech. Opět se tato nehoda obešla bez zranění.

5.7.1 Zvýšení bezpečnosti pasivními prvky

Nejúčinnějším způsob pasivní obrany pro bezpilotní prostředky je totožný s pasivní obranou pro letadla s pilotem na palubě. Česká republika je předním výrobcem záchranných padákových systémů pro ultralehká letadla. Prudký rozvoj bezpilotních letadel způsobil navýšení provozu bezpilotních prostředků a tedy i nárůst leteckých nehod. Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod ÚZPLN eviduje pouze jednu leteckou nehodu bezpilotního letadla. Tento počet však neodpovídá realitě, neboť vyšetřování letecké nehody je podmíněno certifikací letadla. Veškeré necertifikované letadla nejsou předmětem šetření ÚZPLN.

Problematikou záchranných padákových systémů jsem se zabýval ve své bakalářské práci. Jako nejvhodnější typ záchranného systému jsem vyhodnotil systém výrobce GRS Galaxy, který působí v České republice a vyrábí i záchranné systémy pro bezpilotní prostředky.

Principem celého systému je otevření záchranného padáku pomocí pyrogenerátoru (pyrotechnický iniciátor). Po aktivaci dojde k rychlému otevření padáku a zavěšení celého letadla. Tento způsob otevření padáku snižuje minimální výšku záchrany až na 5 m.

6. Zhodnocení

Záměrem diplomové práce bylo popsat princip fungování bezpilotních prostředků se zaměřením na multikoptéry, navrzení vlastní konstrukce rámu kvadroptéry a uvedení zařízení do provozuschopného stavu.

Účelem navržené kvadroptéry je pořizování záznamového materiálu. Všechny použité systémy jsou na trhu volně dostupné. Výhodou vlastní konstrukce je snadná úprava pro použití pro biologickou ochranu letišť a zároveň pro monitorování perimetru letiště. Navržené řešení je variabilnější, než je tomu u konvenčních bezpilotních zařízení.

Ekonomické zhodnocení projektu uvádí následující tabulka (*Tabulka 4*).

Tabulka 4: Cenové zhodnocení stavby kvadroptéry

Prototypový rám			Kompozitní rám		
Materiál	Hliníkový U profil	43 Kč	Materiál	Uhlíková tkanina	345 Kč
	Hliníková kulatina Ø 5 mm	25 Kč		Epoxidová pryskyřice Letoxid	275 Kč
	Spojovací materiál	120 Kč		Balsově prkénka 1 mm	80 Kč
Elektronika	Autopilot Pixhawk	7 062 Kč	Elektronika	Uhlíkový profil 8 x 8	160 Kč
	GPS modul uBLOX	2 340 Kč		Uhlíková trubička Ø 3 mm	44 Kč
	Motory 920 KV	1 030 Kč		Tlumící silentbloky	317 Kč
	Regulátory (ESC 20 A)	1 420 Kč		Gimbal motory 210 KV	518 Kč
	Vrtule 9,5 x 4,5	320 Kč		Osvětlení LED	161 Kč
	Li-pol baterie 3S 5000 mAh	935 Kč		Řídící jednotka gimbalu Storm32	420 Kč
	Přijímač DUPLEX	2 290 Kč		Videokamera GoPro	3 499 Kč
	Telemetrie 433 MHz	399 Kč		Celkový součet	21 803 Kč

Pro sestavení Tabulky 4 byl použit kurz dolaru 1 USD = 26 Kč.

Požizovací náklady ovšem netvoří veškeré náklady. Je třeba zahrnout i náklady provozní, jako je ztráta kapacity baterií vlivem stáří a nákup nových, poškození vrtulí atd. Další, velkou část nákladů tvoří náklady na certifikaci k získání povolení k létání a povolení pro provoz za úplatu. Ekonomické zhodnocení je uvedeno v následující tabulce – *Tabulka 5*. V *Tabulce 5*

jsou pro srovnání uvedeny i náklady na certifikaci modelu letadla s maximální vzletovou hmotností převyšující 20 kg.

Tabulka 5: Ekonomické zhodnocení certifikace bezpilotního letadla a modelu letadla na 20 kg

Bepilotní letadlo			Model letadla nad 20 kg		
Získání povolení k létání letadla	Správní poplatek	4 000 Kč	Získání povolení k létání letadla	Správní poplatek	2 000 Kč
	Správní poplatek	400 Kč		Správní poplatek	200 Kč
	Pojištění letadla (Evropa)	9 800 Kč		Pojištění letadla (Evropa)	7 056 Kč
Povolení k provozování leteckých prací	Správní poplatek	10 000 Kč	Celková cena		9 256 Kč
Celková cena		24 200 Kč			

V Tabulce 5 bylo uvažováno s cenou pojištění vztahující se na celou Evropu (nejdražší varianta). Výše pojistného plnění je 24 700 000 Kč. Cena pojistného je pouze orientační.

Jak je patrné z obou uvedených tabulek, celkové náklady na stavbu a certifikaci se vyšplhají téměř k 50 000 Kč. Celkové náklady jsou tedy značně vysoké. V případě použití multikoptéry s možností umístit na palubu zařízení o větší hmotnosti (zrcadlovou techniku, měřicí zařízení atd.) pořizovací cena letadla roste exponenciálně.

Zhodnotíme-li pořizovací náklady pro úpravu kvadrokoptéry na plašící zařízení, musíme tyto náklady navýšit o dalších 11 984 Kč. Tato cena odpovídá zařízení BirdXPeller-PRO794 navržené v kapitole čtyři. Druhá část čtvrté kapitoly se zabývá použitím kvadrokoptéry pro ochranu perimetru letiště. Cena navrženého zařízení FPV značky Boscám se pohybuje okolo 2000 Kč. Pro prezentaci obrazu lze použít běžný monitor nebo televizi. Pro přenos je použito maximální rozlišení 720p, pro vykreslení obrazu postačí obrazovka s pořizovací cenou v řádech tisíců Kč.

7. Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval bezpilotními prostředky, se zaměřením na multikoptéry. Porovnal jsem rozdíly, převážně legislativního charakteru, mezi bezpilotními letadly a modely letadel. Provedl jsem rozbor různých typů a provedení multikoptér. Popsal jsem hlavní pohyby multikoptér v prostoru v definovaném souřadném systému.

Cílem práce bylo vytvořit návrh konstrukce multikoptéry, která by splňovala stanovené požadavky. Prvním požadavkem bylo navrhnout bezpilotní prostředek, který by byl schopen posílit biologickou ochranou letišť a zvýšit tak bezpečnost letového provozu. Sřet letadla s ptáky je problém, který je dnes řešen pomocí cvičených dravců, kteří mají za úkol odehnat menší ptactvo z okolí vzletových a přistávacích drah. Použitím multikoptér lze získat zařízení schopné plašit ptactvo ze zmíněných míst s velkou efektivitou. Vybavením multikoptéry pro přenos obrazu lze získat multifunkční prostředek, schopný zároveň monitorovat perimetr letiště a zvýšit tak bezpečnost před narušiteli. V této práci jsou popsány úpravy, které je nutné provést na zkonstruované kvadroptěře, aby byla schopna zmíněného použití.

Dalším bodem diplomové práce bylo vytvořit ucelený přehled požadavků, které je třeba splnit, aby byl legislativně schválen provoz navržené kvadroptéry. Tento proces jsem porovnal s požadavky pro certifikaci modelů letadel. Porovnal jsem odlišnosti certifikačních procesů jednotlivých evropských států. Uvedl jsem srovnání s procesy používanými ve Spojených státech amerických a v Austrálii, které považuji za velmi dobře zpracované. Z důvodu velmi rychlého technického rozvoje došlo k značnému zpoždění ve vývoji legislativy.

Je třeba aktivně monitorovat rozvoj bezpilotních prostředků a pečlivě sledovat, jakým směrem se bude ubírat technický vývoj. Dále je třeba harmonizovat předpisy, aby bylo dosaženo maximální efektivity používání bezpilotních prostředků. Zároveň nesmí být předpisy nastaveny tak, aby docházelo k útlumu a zániku provozu bezpilotních prostředků. Na druhé straně nesmí dojít k nekontrolovatelnému rozvoji, ke kterému současný stav legislativních omezení pomalu směřuje. Dostupnost bezpilotních systémů se stává stále více otevřená pro kterékoliv uživatele. Tento začínající problém může narůst do nežádoucích rozměrů. Prodej bezpilotních systémů není nijak omezen. Nezákonné používání tak lze odhalit až v okamžiku vzniku nehody nebo incidentu. Je třeba zavést opatření k zabránění úmyslného zneužití k protiprávním činům a ohrožení všeobecné bezpečnosti. Navzdory těmto velmi rozsáhlým

problémům Ústav civilního letectví zdokonaluje stávající předpisy tak, aby co nejlépe vyhovovaly současným požadavkům společnosti.

V současné době se na celosvětovém trhu začínají objevovat záchranné systémy navržené pro použití v bezpilotních prostředcích. To hodnotím jako velmi významný přínos pro společnost, v podobě zvýšení bezpečnosti provozu bezpilotních zařízení. Bohužel česká legislativa zatím nijak nepojednává o nutnosti použití těchto systémů.

V šesté kapitole jsem se zabýval ekonomickým zhodnocení stavby a certifikačního procesu. Z výsledků hodnocení je možné konstatovat, že cena záchranného padákového systému se rovná ceně navržené kvadrokoptéry. Povinné vybavení každého bezpilotního prostředku záchranným systémem by vedlo k odrazení velkého počtu zájemců z důvodu nadměrné finanční zátěže. Nelze předpovídat, jakým směrem se toto bude ubírat, ale zavedení aktivní ochrany pro případ pádu bezpilotního prostředku je správným krokem.

Použité zdroje

- [1] Česká republika. Letecký předpis: L2 - Pravidla létání, doplněk X. In: *ICAO Annex (L)*. Ministerstvo obrany, 2014. Dostupné z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [2] Směrnice CAA/S-SLS-010-0/2012. *Postupy pro vydání povolení k létání letadla bez pilota*. Praha: Úřad pro civilní letectví, 2012. Dostupné z: <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/postupy-pro-vydani-povoleni-k-letani-letadla-bez-pilota>
- [3] ČSN 31 001. *Letectví a kosmonautika - Terminologie*. Praha. Český normalizační institut: ČSN - vydavatelství, 2005.
- [4] The UAV guide: Multicopter Configurations. *File:Multicopter Configurations.png* [online]. 2014, 12.5. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: http://www.theuavguide.com/wiki/File:Multicopter_Configurations.png
- [5] Air gear 350: Multirotor driving equipment set. *T-motor* [online]. 2013 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: http://www.rctigermotor.com/html/2014/Combo_pack_0930/279.html
- [6] Li-polymer Battery: Substance or Hype. BUCHMANN, Isidor. *Battery University* [online]. Switzerland, 2010 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype
- [7] ZDAŘIL, Bc. Tomáš. *Regulátor otáček pro střídavé motory* [online]. Brno, 2012 [cit. 2015-04-07]. ID 77944. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51821. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Kincl.
- [8] BC. JENÍK, Petr. *Řidicí systém pro trikoptéru*. Praha, 2014. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/24841/F3-DP-2014-Jenik-Petr-prace.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Lubor Jirásek, CSc.

- [9] Metso expertune: What Is PID. *Tutorial Overview* [online]. USA: Metso Automation, 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.expertune.com/tutor.aspx>
- [10] MEIER, Lorenz, Dominik HONEGGER a Marc POLLEFEYS. *PX4 Autopilot: A Node-Based Multithreaded Open Source Robotics Framework for Deeply Embedded Platforms* [online]. ICRA (Int. Conf. on Robotics and Automation), 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <https://pixhawk.org/choice>
<http://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [11] *JETI model* [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.jetimodel.com/cs/>
- [12] *3D Robotics: Drone & UAV Technology* [online]. San Diego, 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://3drobotics.com/>
- [13] MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Measurement of Brushed DC Electric Motor Constants: Measurement Procedures* [online]. Cambridge, 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/motor_measure.pdf
- [14] GoPro: product comparison. *Gopro be a hero* [online]. 2015 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://gopro.com/product-comparison-hd-hero2-hd-hero-cameras/>
- [15] Plašiče: Nové produkty. *BirdXPeller-PRO794* [online]. 2012 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: http://www.plasice.cz/index.php?main_page=product_info&products_id=152
- [16] Aircraft Birdstrike Avoidance Radars. MERLIN. *DeTect* [online]. 2014 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.detect-inc.com/merlin.html>
- [17] Česká republika. Vyhláška o plánu přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka): Plán přidělení kmitočtových pásem. In: *SBÍRKA ZÁKONŮ*. 2010, Sbírka zákonů č. 105, Příloha k vyhlášce č. 105/2010 Sb. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/kmitoctova_tabulka/vyhlaska_105-2010_sb038-10.pdf
- [18] GREVE, Alex. *Video aerial systems: FPV – A Guide to Success* [online]. Madison Heights, Virginia, 2015 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://videoaerialsystems.com/fpv-a-guide-to-success/>
- [19] ANDĚL, Ing. Vladimír. Natáčení zvuků z přírody - díl 3. *Příroda.cz* [online]. 1. září. 2004 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.priroda.cz/clanky.php?detail=154>

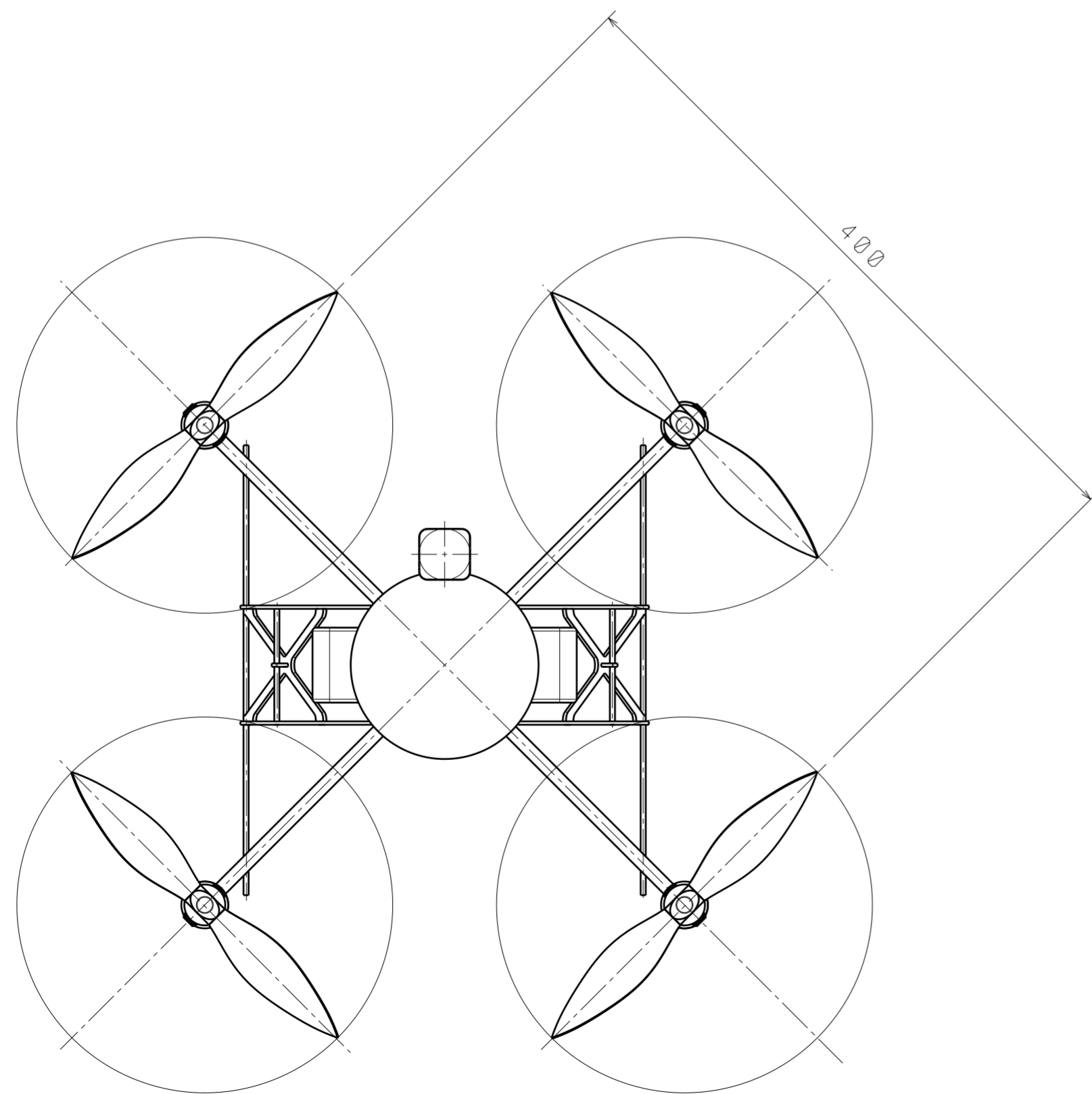
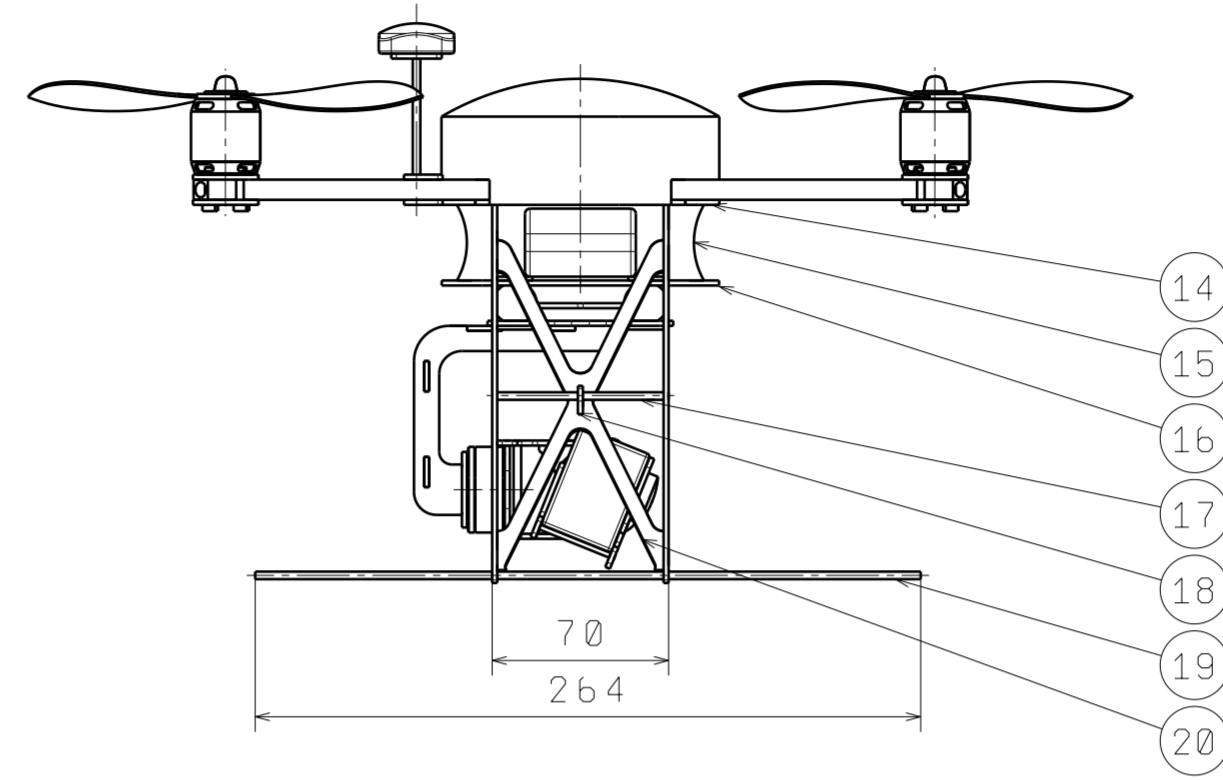
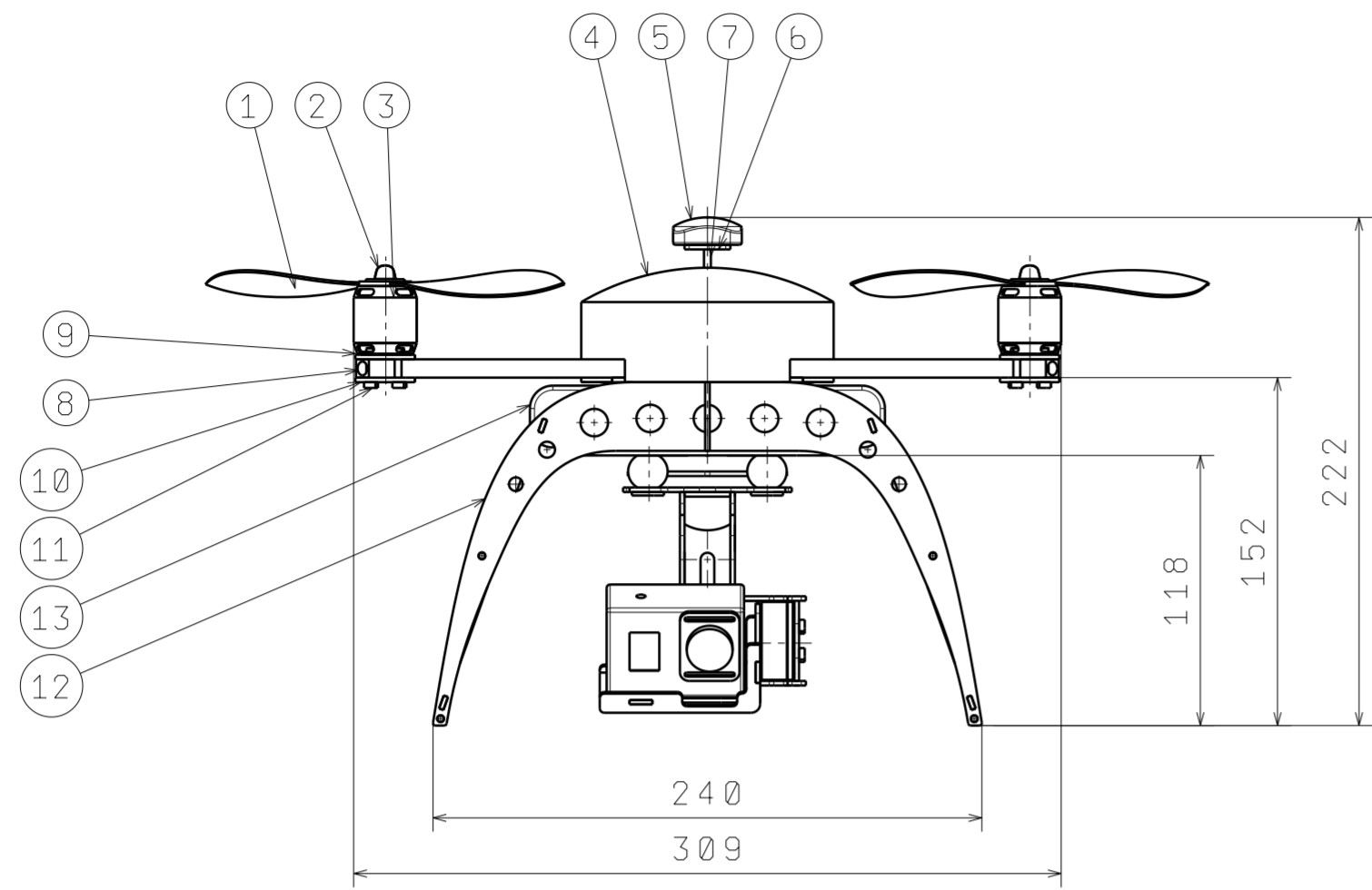
- [20] Plašiče: Nové produkty. *BirdXPeller-PRO794* [online]. 2012 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: http://www.plasice.cz/index.php?main_page=product_info&products_id=152
- [21] Aircraft Birdstrike Avoidance Radars. MERLIN. *DeTect* [online]. 2014 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.detect-inc.com/merlin.html>
- [22] APM Copter. MULTIROTOR UAV. *Introducing Copter* [online]. 3D Robotics, 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://copter.ardupilot.com/wiki/introduction/>
- [23] The IUCN red list of Threatened Species. 2014. *Sturnus vulgaris: BirdLife International 2014* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.iucnredlist.org/details/22710886/0>
- [24] *GRS Galaxy: Multicopters. ZÁCHRANNÝ SYSTÉM, DRON, MULTICOPTER, UAV* [online]. 2015. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.galaxysky.cz/multicopters-s71-cz>
- [25] *Unmanned Aircraft System Operations in UK Airspace – Guidance: CAP 722* [online]. Sixth Edition. Safety and Airspace Regulation Group, 2015, last modified 31 March 2015 [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: <http://www.caa.co.uk/docs/33/CAP%20722%20Sixth%20Edition%20March%202015.pdf>
- [26] AUSTRALIAN GOVERNMENT. *Civil Aviation Safety Authority: Model aircraft and RPA* [online]. 2015 [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: http://casa.gov.au/scripts/nc.dll?WCMS:STANDARD::pc=PC_100375
- [27] *Interpretation of the Special Rule for Model Aircraft* [online]. Federal Aviation Administration, 2014 [cit. 2015-04-14]. Docket No. FAA-2014-0396, 14 CFR Part 91. Dostupné z: http://www.faa.gov/uas/media/model_aircraft_spec_rule.pdf
- [28] *Federal register: Operation and Certification of Small Unmanned Aircraft Systems* [online]. Department of Transportation. Federal Aviation Administration, 2015, February 23 2015 [cit. 2015-04-14]. Part 3. Dostupné z: <http://www.regulations.gov/#!documentDetail;D=FAA-2015-0150-0017>
- [29] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *U.S. Department of Transportation* [online]. Washington, DC, 2015 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.faa.gov/>

- [30] Multirotor: Service - Drone. 2015. *Unique stability - Brushless Gimbals: MULTIROTOR G4 4.8 Eagle Brushless II* [online]. Berlin [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.service-drone.com/en/technology/brushless-gimbals>
- [31] WEIHUA ZHAO, TIAUW HIONG GO,. Quadcopter formation flight control combining MPC and robust feedback linearization
- [32] BERNARD TAT MENG LEONG. SEW MING LOW, MELANIE PO-LEEN OOI. Low-Cost Microcontroller-based Hover Control Design of a Quadcopter
- [33] Poradák rozboru bezpečnosti za 1. čtvrtletí 2014: Bezpilotní letadlo MK HexaXL. 2014. In: *Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.uzpln.cz/pdf/3tD8v3ek.pdf>
- [34] *Úřad pro civilní letectví: Je nějak omezen provoz bezpilotních letadel v blízkosti letišť?* [online]. 2011. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/provoz-v-blizkosti-letist-a-ochranna-pasma-letist?highlightWords=uav>
- [35] ČESKOMORAVSKÁ MODELÁŘSKÁ ASOCIACE. 2014. 2. *Pojištění bezpilotních systémů č. 490 001 475* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://cmma.cz/pojisteni-bezpilotniho-letadla-2/>
- [36] Storm32 BGC. 2015. *BOARDS: GLB STorm32 v1.31* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.olliw.eu/storm32bgc-wiki/Boards>
- [37] KOLKOVÁ, Olga. 2015. *CDR: Bývalý člen NASA má lék na odlesňování, drony zasadí miliardu stromů ročně* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://cdr.cz/clanek/byvaly-clen-nasa-ma-lek-na-odlesnovani-drony-zasadi-miliardu-stromu-rocne>
- [38] Hobbyking: Batteries & Accessories. 2015. *ZIPPY Flightmax 5000mAh 3S1P 30C* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://hobbyking.com/hobbyking/store/_8587_ZIPPY_Flightmax_5000mAh_3S1P_30C.html
- [39] Australian Certified UAV Operations Inc. 2014. *Industry Information: How do we see them: VLOS, EVLOS, BVLOS & FPV* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.acuo.org.au/industry-information/terminology/how-do-we-see-them/>

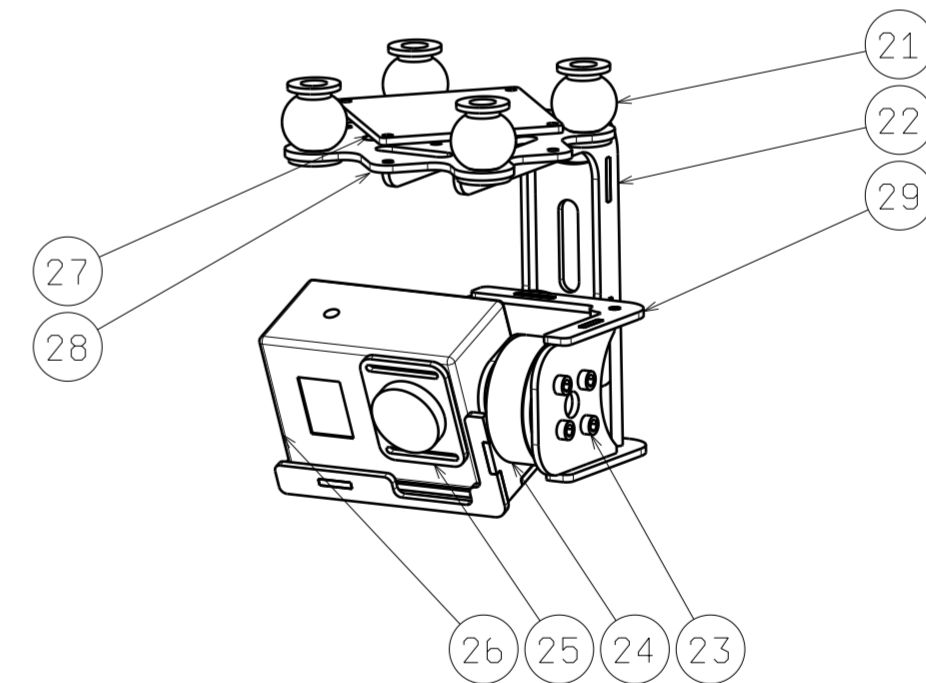
- [40] Kurzinformation über die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen. *www.bmvbs.de*. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2013. Dostupné také z: <http://www.riot.ch/wp-content/uploads/2014/01/BMVBS-Kurzinformation-unbemannte-Luftfahrtsysteme-10.2013.pdf>
- [41] Single TTL 3DRobotics 3DR Radio Telemetry Kit 433Mhz for APM APM2.5 2.52 2.6 2.8 Pixhawk. *Aliexpress* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.aliexpress.com/item/Single-TTL-3DRobotics-3DR-Radio-Telemetry-Kit-433Mhz-for-APM-APM2-5-2-52-2-6/1966870930.html>
- [42] NEDELKA, Milan. *Slovenský letecký slovník terminologický a výkladový*. Bratislava: Magnet Press, 1998, 494 s. ISBN 80-968-0730-7.
- [43] SLANEC, Pavel. Brushless neznamená střídavý. *RCR-radio control revue*. Praha, 2015, XVI(4): 16-19. ISSN 1213-130X.

Seznam příloh

Příloha 3.1	Výkres sestavy kvadrokoptéry
Příloha 3.2	Kusovník použitých komponentů



Gimbal isometric view
Scale: 1:2



CESKE VYSOKE UCENI TECHNICKE FAKULTA DOPRAVNI		DIPLOMOVA PRACE	
DRAWN BY S. Absolon	DATE 7. 5. 2015	DRAWING TITLE SESTAVA KVADROKOPTERY	
CHECKED BY Ing. Vittek	DATE 26. 5. 2015	SIZE A2	DRAWING NUMBER 10-15-Quadcopter
DESIGNED BY	DATE	SCALE 1:3	WEIGHT (kg) 1,3 Kg
		SHEET	1/2

27	Vodorovný rám gimbalu	1
26	Go Pro kamera	1
25	Držák kamery	1
24	Motor gimbalu 210 KV	2
23	Imbus šroub M2 x 8	8
22	Svislý rám gimbalu	1
21	Tlumící silentbloky	4
20	Diagonální vzpěra podvozku	2
19	Lyžina	2
18	Spojka diagonální vzpěry	2
17	Podélná vzpěra	2
16	Základní deska spodní	1
15	Vzpěra podvozkové nohy	2
14	Základní deska střední	1
13	Baterie 5000 mAh	1
12	Podvozková noha	2
11	Imbus šroub M3 x 15	18
10	Lože motoru	4
9	Řídící modul gimbalu	1
8	Nosník 8 x 8	4
7	Základní deska gimbalu	1
6	Držák GPS	1
5	GPS Modul	1
4	Kryt elektronického zařízení	1
3	Motor 920 KV	4
2	Kužel vrtule	4
1	Vrtule 9,5 x 4,5''	4
Number	File name	Quantity

CESKE VYSOKE UCENI
TECHNICKE

FAKULTA DOPRAVNI

DIPLOMOVA PRACE

DRAWING TITLE

SESTAVA KVADROKOPTERY

DRAWN BY

DATE

S. Absolon

7. 5. 2015

CHECKED BY

DATE

Ing. Vittek

26. 5. 2015

DESIGNED BY

DATE

SIZE

A4

DRAWING NUMBER

KUSOVNIK SESTAVY

SCALE 1:1

SHEET 2/2

D

A