

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích**  
**Přírodovědecká fakulta**

**Konstrukce prostředku UAV pro  
environmentální výzkum**

Bakalářská práce

**Adéla Vojáčková**

Školitel: PhDr. Milan Novák, Ph.D.

České Budějovice 2021

## **Bibliografické údaje**

Vojáčková A., 2021: Konstrukce prostředku UAV pro environmentální výzkum [Construction of a UAV for environmental research. Bc.. Thesis, in Czech] - 80 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

## **Anotace**

The subject of the bachelor thesis is the implementation of an unmanned aircraft vehicle for environmental research. The theoretical part maps the types and uses of unmanned aerial vehicles, the legislative framework for their operation and a description of individual components. The practical part deals with the design, construction and subsequent configuration of the device.

Zkonstruovaný model bezpilotního prostředku je uložen v laboratoři robotiky a mikropočítačové techniky Ústavu aplikované informatiky v budově C Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracovala pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne 13. 4. 2021

.....

Vojáčková Adéla

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu, panu PhDr. Milanovi Novákovi, Ph.D. za zapůjčení komponentů a poskytnutí podnětných rad a připomínek ke zpracování této bakalářské práce.

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>CÍLE PRÁCE.....</b>	<b>2</b>
<b>METODIKA PRÁCE.....</b>	<b>3</b>
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>4</b>
<b>1 BEZPILOTNÍ PROSTŘEDKY.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Základní pojmy a definice.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Kategorizace bezpilotních prostředků .....</b>	<b>6</b>
1.2.1 Rozdělení dle konstrukce.....	6
1.2.2 Rozdělení dle autonomie .....	9
<b>1.3 Způsob využití UAV.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Legislativa provozu.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Evropská legislativa .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Nejzásadnější pravidla.....</b>	<b>13</b>
2.2.1 Registrace .....	13
2.2.2 Kategorizace provozu .....	14
2.2.3 Prostory létání .....	16
2.2.4 Parametry prodávaných dronů .....	16
<b>2.3 Přejídné období.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4 U-Space .....</b>	<b>19</b>
<b>3 Základní části bezpilotního prostředku.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Rám dronu.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 Motory.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3 Vrtule.....</b>	<b>22</b>
<b>3.4 Baterie .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5 Regulátory.....</b>	<b>24</b>
<b>3.6 Servomotor .....</b>	<b>25</b>
<b>3.7 Řídící elektronika.....</b>	<b>26</b>
<b>3.8 Ovládací software.....</b>	<b>27</b>

3.9	Dálkové ovládání.....	28
3.10	Telemetrie a videopřenos.....	29
<b>II.</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>Základní předpoklady pro návrh UAV .....</b>	<b>31</b>
4.1	Velikost a stabilita.....	31
4.2	MTOM a nosnost .....	31
4.3	Doba letu a rychlost .....	32
<b>5</b>	<b>Koncepční návrh UAV .....</b>	<b>33</b>
5.1	Volba koncepce bezpilotního prostředku .....	33
5.2	Výběr komponentů .....	34
5.2.1	Kostra.....	34
5.2.2	Ovládání.....	35
5.2.3	Řídící jednotka.....	36
5.2.4	GPS .....	38
5.2.5	Software řízení.....	38
5.3	Výběr koncepce pohonu .....	41
5.3.1	Výpočet hmotnosti.....	41
5.3.2	Volba elektromotorů .....	41
5.3.3	Výběr baterie .....	45
5.4	Kontrolní výpočty .....	47
<b>6</b>	<b>Konstrukce .....</b>	<b>50</b>
6.1	Výroba ramen.....	50
6.1.1	3D modeling, tisk.....	51
6.1.2	Kompletace ramene .....	52
6.2	Sestavení modelu .....	53
6.3	Zapojení palubní elektroinstalace .....	54
<b>7</b>	<b>Základní nastavení a testování .....</b>	<b>59</b>
7.1	Nastavení RC systému .....	59
7.2	Nastavení řídicí jednotky.....	60
7.2.1	Instalace QGroundControl .....	60
7.2.2	Instalace firmware PX4 a specifikace letounu.....	61
7.2.3	Kalibrace systému.....	62

7.2.4	Nastavení rádia .....	63
7.2.5	Nastavení letových módů .....	64
7.2.6	Failsafe.....	64
<b>7.3</b>	<b>Testování funkčnosti.....</b>	<b>66</b>
<b>7.4</b>	<b>Testovací let .....</b>	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>70</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>71</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POJMŮ .....</b>	<b>76</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>78</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>80</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>80</b>

# ÚVOD

Dálkově řízené prostředky stále více vstupují do našich životů. Dávno už je minulostí, že se UAV prostředky používaly pouze pro vojenské účely, kde plnily úlohu náhrady klasických letadel v oblastech zvýšeného nebezpečí. Rozsáhlé možnosti využití a jejich rychlý vývoj v komerční oblasti vytvořily zcela nové příležitosti v odvětvích, kde bychom si je nedokázali představit. Zahlcení trhu výrazným množstvím nových výrobců způsobilo, že se bezpilotní prostředky staly cenově dostupnými a tím narostl počet uživatelů, kteří je využívají jak pro zábavu, tak i pro svou obživu například v rámci podnikání. Díky flexibilitě a širokému využití mají zájem o bezpilotní prostředky jak komerční, tak vědecká odvětví, kde pro ně nacházejí mnohostranné uplatnění. Mezi nejčastější využití patří záchranné mise, průzkum těžko přístupných míst, monitorování a snímkování vybraných objektů [1] [2].

Bezpilotní letouny patří k jedním z nástrojů pro sběr dat – našem případě se zaměřením pro oblast životního prostředí. Pořizování dat funguje podobně jako u družic či pilotovaných letadel, avšak je finančně mnohem dostupnější a díky tomu, že jsou data sbírána z menších výšek, jsou přesnější. Také výroba i provoz jsou výrazně šetrnější k životnímu prostředí.

Tato bakalářská práce se zabývá optimálním řešením návrhu UAV prostředku a jeho následnou konstrukcí. Práce se zaměřuje především na problematiku bezpilotních letounů z hlediska různých požadavků, a to konkrétně na dobu letu, nosnost a autonomní provoz. Praktickou částí je návrh a konstrukce konkrétního UAV prostředku.

# CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je optimální návrh bezpilotního prostředku a jeho následná konstrukce. Tento prostředek bude sloužit k průzkumu a sběru dat v environmentálním výzkumu. K naplnění hlavního cíle je rovněž nutné splnit následující dílčí cíle:

- Analyzovat problematiku bezpilotních prostředků, které se využívají pro environmentální výzkum
- Navrhnout optimální řešení UAV, který bude splňovat podmínky legislativy ČR pro provoz bezpilotních prostředků

Práce bude rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zaměřuje na základní aspekty bezpilotních prostředků v podobě jejich kategorizace, způsobu využití, konstrukci a řídicích systémů. Dále se zabývá právními předpisy ČR a Evropské Unie pro provoz bezpilotních prostředků a popis komponentů, které lze pro konstrukci použít.

Druhá část je zaměřena na návrh a praktickou realizaci konkrétního bezpilotního prostředku, který bude vycházet z analýzy technologických možností. Jednotlivé vybrané komponenty budou popsány společně s postupem sestavení.



# METODIKA PRÁCE

K realizaci konstrukce UAV prostředku je provedena analýza dané problematiky. Následná problematika je v teoretické části zdokumentována a popsána.

V teoretické části je definován bezpilotní prostředek. Následně jsou uvedeny kategorizace a způsoby využití UAV prostředků. Dále jsou rozebrána pravidla pro provoz bezpilotních prostředků na území České republiky a Evropské Unie, kterými se musí výsledný zkonstruovaný prostředek řídit. Z těchto pravidel vychází následné požadavky pro návrh konstrukce a výběr optimálních částí bezpilotního prostředku. Z teoretické části vychází praktická část, která se zaměřuje na finální konstrukci UAV prostředku z vybraných komponentů.

1. Analýza dostupné literatury spojené s danou problematikou
2. Rešerše možností využití
3. Navržení a popsání optimálního řešení
4. Realizace konkrétního UAV prostředku z vybraných komponentů
5. Instalace softwarového a hardwarového vybavení pro autonomní let a plánování leteckých misí za účelem sběru dat

# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 BEZPILOTNÍ PROSTŘEDKY

V dnešním moderním světě je zapotřebí takové letecké techniky, která se obejde bez lidské posádky a může tak být využita k výzkumu v těžko dostupných oblastech či v rizikových situacích, aniž by byl ohrožen lidský život. Tyto prostředky označujeme anglických termínem UAV (Unmanned Aerial Vehicles) [3]. Českým ekvivalentem je bezpilotní prostředek. Také můžeme setkat se slangovým výrazem „dron“, který je převzat z anglického slova „drone“.

## 1.1 Základní pojmy a definice

V souvislosti s bezpilotními prostředky se objevila řada nových pojmů, které bývají často zaměňovány. Je tedy potřebné definovat tyto pojmy, které jsou v práci použity a jejich význam je klíčový pro pochopení problematiky v následujících kapitolách. Následující definice vychází z Doplnku X, leteckého předpisu L 2.

**Autonomní letadlo:** „*Bezpilotní letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu*“ [4]

**Bezpilotní letadlo (UA):** „*Letadlo určené k provozu bez pilota na palubě*“. [4] V této práci budeme značit tento pojem celosvětovým označením UAV („Unmanned aerial vehicle“), tedy bezpilotní letecký prostředek.

**Bezpilotní systém (UAS – „Unmanned aerial system“):** „*Systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat. Bepilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více*“ [4]

**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*“ [4]

## 1.2 Kategorizace bezpilotních prostředků

Existuje celá řada klasifikací bezpilotních prostředků. Rozdělení se provádí pro zjednodušení volby výběru daného prostředku pro konkrétní činnost. Základní rozdělení, ze kterého vychází legislativa v mnoha zemích, je dělení na UAV pro rekreační využití a UAV určené pro profesionály [4]. Dalšími kritérii rozdělení může být například konstrukce, účel použití, velikost, hmotnost, výkonnostní charakteristika, způsob ovládání aj. Podstatné rozdělení je popsáno v podkapitolách níže [2].

### 1.2.1 Rozdělení dle konstrukce

Mezi primární klasifikaci patří dělení podle konstrukce. Bepilotní prostředky můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin, které se liší konstrukcí i způsobem letu.

#### 1.2.1.1 Letoun s pevným křídlem

Jedná se o letadlo, které je těžší než vzduch a ke svému pohybu využívá aerodynamických sil na speciálně tvarovaných plochách křídel, okolo kterých proudí vzduch. Letoun se tak musí neustále pohybovat určitou rychlostí, aby ho vztlaková síla udržela ve vzduchu. Pohyb dopředu je zpravidla zajištěn elektrickým nebo spalovacím motorem. Pokud motor funguje správně, k plynulému letu není zapotřebí velké energie. K udržení letounu ve vzduchu stačí překonat odpor vzduchu, tedy aby vztlaková síla byla větší nebo se rovnala síle tíhové. Většina letounů je konstruována jako aerodynamicky stabilní, pokud tedy z nějakého důvodu motor selže nebo dojde k vybití baterie, letoun začne rovnoměrně klesat klouzavým letem, je stále ovladatelný a s minimální rychlostí dopadá na zem [1]. Příkladem letounu je samokřídlo eBee X (Obrázek 1), které se využívá pro mapování oblastí.



Obrázek 1, mapovací letoun SenseFly eBee X [5]

Mezi hlavní výhody letounů patří úspora energie. Letouny dokážou létat i několik hodin, jsou tedy vhodné pro vzdálené či dlouhotrvající lety. Nevýhodou je především horší manévrovatelnost a neschopnost přistání na přesném místě. Negativem také je potřeba nízké hmotnosti. S vyšší hmotností se narůstají nároky na rychlost, tedy i na potřebou energii. Díky svým vlastnostem se letouny používají převážně pro letecký monitoring a mapování velkých ploch.

Vzlet letounu lze provést několika způsoby. Menší prostředky lze hodit z ruky, pro větší a mohutnější letouny je zapotřebí startovací rampy či gumového katapultu. Přistání ve většině případů probíhá na zem, musí však být vybrána správná přistávací lokalita.

### **1.2.1.2 Multikoptéra**

Multikoptéry jsou unikátním typem bezpilotních prostředků. Pro pohon obvykle využívají určitý počet rotorů, které vytváří vztlak. Zařízení s jedním rotorem nese název helikoptéra neboli vrtulník s kolmým vzletem. Ovládání multikoptéry je náročnější oproti letounu a zpravidla bývá opatřen stabilizačními systémy. Jelikož není aerodynamický jako letoun, při vypnutí motoru padá přímo k zemi.

Pro ovládání multikoptéry se využívá nastavitelnosti rychlosti otáček jednotlivých rotorů. Směr letu závisí na výslednici působících sil. Pro přímý pohyb je zapotřebí snížení otáček v přední části a zvýšení v části zadní. Stejný princip platí o ovládání do stran. Vztlaková síla zůstává stejná, zvyšuje se však krouživý moment, jenž ovládá rotaci multikoptéry.

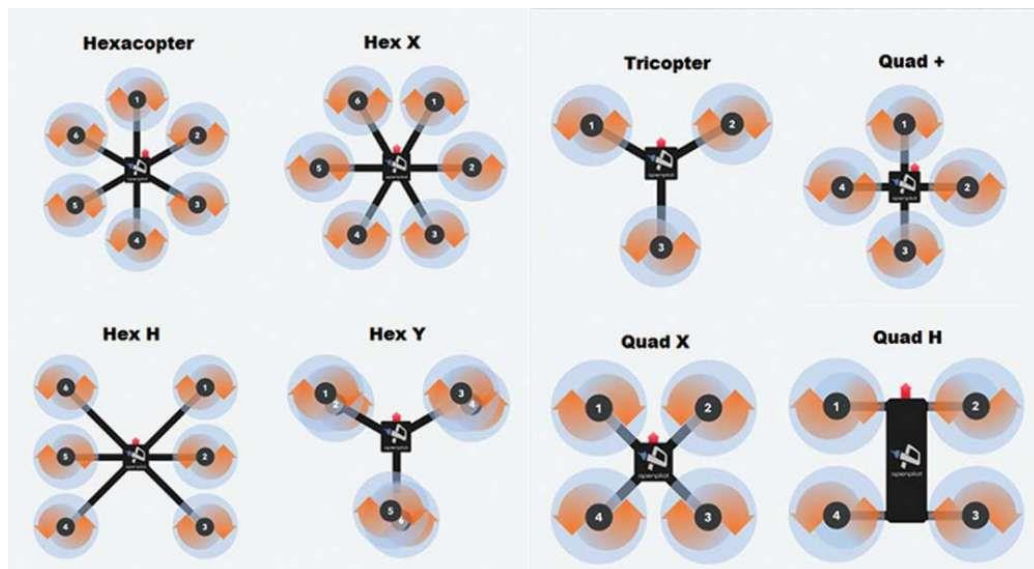
Samotný vzlet i přistání probíhají kolmo vzhůru nebo dolů, není tedy zapotřebí velkého prostoru a lze je provádět téměř kdekoliv. Výhodou je dobrá manévrovatelnost. Hlavní nevýhodou je krátká výdrž ve vzduchu způsobená hmotností a náročnějším pohybem ve vzduchu [1]. Příkladem dané konstrukce je oktokoptéra firmy DJI (Obrázek 2).



*Obrázek 2, oktokoptéra DJI S1000 [6]*

Sudý počet rotorů se používá k vyrušení kroutivého momentu, který vzniká společně se vztlakovou silou na každém rotoru. Z toho důvodu je jedna polovina pravotočivá a druhá levotočivá. Výjimkou je trikoptéra, která obsahuje 3 rotory se stejným směrem otáčení a jejich moment setrvačnosti je eliminován příčným sklopením zadního motoru.

Multikoptéry se rozlišují podle počtu rotorů. Nejrozšířenějším typem je kvadrokoptéra, která používá 4 motory s vrtulemi. Patří k nejoblíbenějším typům pro modeláře a amatérské fotografy, ale neztratí se ani při využití v oblasti vědy. Pro profesionální účely se nejčastěji využívají typy hexakoptéry (6 rotorů) a oktakopty (8 rotorů). Hlavní výhodou těchto konstrukcí je lepší stabilita, vyšší výkon a schopnost bezpečného přistání při výpadku jednoho či více motorů. Díky těmto schopnostem se mohou osadit nejrůznějším vybavením, jako jsou profesionální fotoaparáty či videokamery.



Obrázek 3, možnosti konfigurace motorů multikoptér [7]

### 1.2.1.3 Hybrid VTOL Fixed-Wing UAV

Díky spojení výše uvedených modelů vznikly tzv. hybridy, které využívají hlavních výhod předchozích konstrukcí. Letoun VTOL kombinuje možnost vertikálního vzletu a přistání s efektivitou pevného křídla s klouzavým letem. Jak už název napovídá, jedná se o spojení fixního křídla s rotory. Konstrukce umožňuje vertikální vzlet i přistání, proto není zapotřebí startovací rampy nebo velkého prostoru pro přistání. Fixní křídlo s aerodynamickými vlastnostmi umožňuje úsporu energie, tudíž zvyšuje následnou dobu letu. Mezi základní VTOL konstrukce lze zařadit Tail-sitter, Tilt-rotor či Quad-plane.

Dříve se využívaly především pro vojenské účely, dnes se dostávají do hledáčku pro komerční využití. Pro své výhody se používají hlavně na letecký monitoring, pořizování fotografií nebo mapování prostoru a terénu v těžko dostupných lokalitách [8].



*Obrázek 4, Hybrid Helvetis – Jabali VTOL [9]*

## **1.2.2 Rozdělení dle autonomie**

Mezi výhody bezpilotních prostředků patří jejich autonomie (samostatnost). Autonomie umožňuje plnit předem naplánovanou trasu, zatímco se operátor zabývá jinými činnostmi [10].

### **1.2.2.1 Plně dálkově ovládané UAV**

Tento typ je nejčastěji využíván mezi modeláři či amatérskými letci kvůli požitku z plně manuálního létání. Systém je tedy pilotován ve všech fázích a při přerušení datového spojení dojde ke zřícení modelu.

### **1.2.2.2 Částečně autonomní UAV**

Tato forma umožňuje jak plně manuální ovládání, tak i rozvrhnout úlohy mezi pilota a řídicí jednotku. Zařízení dokáže samostatně letět po bodech, které byly naprogramovány v trase automatického letu, zatímco se operátor věnuje například ovládáním fotoaparátu. Není však schopný reagovat na nečekané situace, které mohou nastat, kupříkladu náhlá překážka. Je tedy důležitá pozornost operátora, který upravuje směr letu a vyhýbá se nepředvídatelným situacím. Mezi částečně ovládatelné lze zařadit také modely, které bývají ovládány manuálně, avšak při přerušení datového spojení dokážou zjistit tuto kolizi a bezpečně se vrátit na místo vzletu.

### 1.2.2.3 Plně autonomní UAV

Tento typ je schopen se sám pohybovat v prostoru a čase prostřednictvím svých senzorů. Dokáže reagovat na okolí a případně samovolně měnit dráhu letu, aniž by musel operátor zasáhnout do řízení. V současné době je tento systém stále v rámci výzkumu a vývoje, jelikož existují různá rizika, která představují potenciální nebezpečí, například z hlediska špatného vyhodnocení situace a tím způsobení určité kolize. V současnosti je tento způsob létání v České republice zakázán.

## 1.3 Způsob využití UAV

Vývoj bezpilotních prostředků má za sebou dlouhou cestu, která započala ve vojenském průmyslu. V tomto odvětví slouží převážně k leteckému snímkování, průzkumu oblastí, při bojových misích nebo pro zneškodňování cílů. V dnešní době zaznamenaly drony obrovský rozmach v civilním sektoru. Rozšiřuje se jak množství využívaných bezpilotních letounů, tak oblasti, ve kterých jsou využívány. Nejjednodušším využitím je samozřejmě pro zábavu, ale potenciál aplikace bezpilotních prostředků je vysoký a lze si je představit téměř všude. Ve státních službách pomáhají při pátracích akcích, jsou nasazovány pro sběr vzorků v zamořených oblastech, vyhledávají ohniska požáru či dopravují zásoby zdravotnického materiálu jednotkám v nouzi v těžko přístupných oblastech pro vrtulník [11]. Ukázkou daného typu multikoptéry je policejní dron BRUS (Obrázek 5).



Obrázek 5, Bepilotní rotorový universální systém (BRUS) Policie ČR [12]



Pro komerční účely se využívají například ve zemědělství, kde bezpilotní prostředky sledují za pomoci klasických či infračervených kamer stav úrody nebo zdraví rostlin. V budoucnosti by mohl být využíván pro zavlažování nebo sám aplikovat hnojiva a pesticidy.

Největší pozorností se bezpilotní letouny těší v oblasti fotografování a natáčení. V těžko dostupných podmínkách je jejich využití takřka bezkonkurenční. Nahradily vrtulníky a letadla, kdy se pro záběry z ptačího oka staly finančně výhodnějšími a časově méně náročnějšími. Z hlediska mapování jsou detailnější, jelikož umožňují snímat z menší vzdálenosti. Pro environmentální výzkum představují vhodný prostředek pro detailní monitorování, snímkování určitých oblastí a sběr dat za pomoci senzorů a kamer [13].

## 2 Legislativa provozu

V České republice provádí dohled nad veškerým vzdušným provozem Úřad pro civilní letectví ČR (ÚCL), který spadá pod Ministerstvo dopravy. Provozování letadel a jakékoli veřejné civilní využití vzdušného prostoru řídí se zákonem č.49/1997 Sb. o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů [14]. Dne 1. března 2012 vešel v platnost Doplněk X leteckého předpisu L2 – pravidla létání podle ustanovení § 102 odst. 2 zákona o civilním letectví, který stanovil podmínky pro provoz bezpilotních letadel a velmi striktně rozdělil modelářské aktivity od komerčního využití [15].

Danými zákony a předpisy se vzdušný prostor nad územím České republiky řídil do 30. prosince 2020. Poté vzešla v platnost zcela nová evropská legislativa, která sjednocuje pravidla létání ve státech spadající do Evropské Unie.

### 2.1 Evropská legislativa

V roce 2019 evropské orgány zveřejnily pro členské státy Evropské Unie konečné znění nových jednotných pravidel pro provozování bezpilotních systémů, které zpracovala Evropská agentura pro bezpečnost letectví (EASA). Jednotlivé státy měly následně povinnost novou legislativu zabudovat do jejich předpisů. V platnost měla legislativa vstoupit 1. července 2020, z důsledku krize COVID-19 se nabytí platnosti legislativy odložilo na konec roku 2020 [16].

Evropská agentura vytvořila dokument eRules UAS pro bezpilotní systémy, který poskytuje přehledné informace z oficiálně vydaných nařízení (EU) 2019/947 a (EU) 2019/945 a umožňuje tak zpřístupnit daná pravidla efektivním a spolehlivým způsobem zainteresovaným stranám [17]. Spis eRules slouží jako zdroj všech pravidel v oblasti bezpečnosti letectví platných pro uživatele evropského vzdušného prostoru.

Mezi hlavní cíle nové evropské legislativy patří [18]:

- sjednocení a zpřehlednění pravidel ve všech zemích EU
- bezpečnost leteckého provozu, lidí, jejich soukromí a životního prostředí
- zjednodušení pohybu dronů a souvisejícího zboží pro prodejce a dodavatele a s tím související rozvoj celého odvětví

## 2.2 Nejzásadnější pravidla

Evropská legislativa přináší určité změny oproti Doplnku X [4]. Nařízení již nerozděluje provoz bezpilotních prostředků na hobby a komerční, mění limit výšky, který nyní činí 120 m AGL v třídě G, nebo upravuje hmotnostní kategorie. Další důležité změny jako registrace, kategorizace či parametry bezpilotních prostředků jsou popsány níže.

### 2.2.1 Registrace

Prvním zlomovým pravidlem je povinná registrace provozovatele bezpilotního prostředku. Neregistruje se daný stroj, ale jeho provozovatel, který zpravidla bývá jeho vlastníkem. Povinná registrace se týká všech osob, kteří provozují UAS s váhou větší než 250 g nebo je vybaveno kamerou či jiným záznamovým vybavením, které by mohlo zaznamenat „osobní údaje“. Jedinou výjimkou tvoří hračky do 250 g, které registraci nepodléhají. Hračkou se rozumí bezpilotní prostředek, který je již předem vyvinutý jako zařízení určené k hraní pro děti do 14 let, je identifikován základním označením CE a je na něm uvedeno, že odpovídá směrnici č. 2009/48/ES [19].

Po vyplnění registrace provozovatel získá jedinečné registrační číslo, kterým následně označí veškeré své UAV, i ty soukromě zhotovené. Registrační číslo obsahuje kód členského státu (pro Českou republiku kód CZE) následovaný 12 alfanumerickými znaky, kontrolním součtem a třemi neveřejnými znaky [20].

Následující částí je registrace pilota bezpilotního systému. Pilot musí absolvovat on-line test obsahující 40 otázek, které prověří teoretické znalosti dané osoby. Po splnění veškerých podmínek získá registrační číslo pilota včetně oprávnění k provozování letadel v určité kategorii [20]. Prozatím se lze registrovat pouze v rámci Otevřené kategorie (Open), podmínky pro registraci v ostatních kategoriích nebyly upřesněny. Doklad o absolvování online výcviku je zobrazen na Obrázku 6.



Obrázek 6, Průkaz pilota

## 2.2.2 Kategorizace provozu

Legislativa zavádí tři základní kategorie provozu UAS: Open, Specific a Certified. Každá kategorie podléhá odlišnému způsobu regulace a odlišné míře nároků na provozovatele, piloty, techniku apod [19].

### 2.2.2.1 Kategorie Open

Je určena především pro širokou veřejnost, neboť zahrnuje drony, které jsou provozovány s relativně nízkým provozním rizikem, a proto nepodléhají potřebě certifikace, ani povolení ÚCL nebo prohlášení. Kategorie umožňuje provoz dronu za podmínek [21]:

- registrace provozovatele a pilota
- dron nepřesahuje 25 kg, a přitom spadá do jedné ze „tříd“ dronů dle práva EU nebo je soukromě zhotoven, nebo i bez označení „třídy“ splní další podmínky pro použití ve dvouletém přechodném období
- provoz nepřekročí žádné z omezení pro otevřenou kategorii (VLOS, provoz do 120 m nad terénem a v požadované vzdálenosti od nezúčastněných osob a shromáždění lidí, minimální věk pilota 16 let)

Otevřená kategorie se dále rozděluje do tří podkategorií A1 – A3 s rozdílnými požadavky na MTOM, minimální vzdálenost od lidí, úroveň proškolení pilota apod. Podmínky létání a parametry strojů v daných podkategoriích jsou přehledně formulovány v Tabulce 1:

Otevřená kategorie – provozní omezení	
A1	- pro letadla třídy C0, C1 nebo pro soukromé stavby letadel s MTOM do 250 g a s maximální provozní rychlostí nižší než 19 m/s; - letadla třídy C1 nesmí přelétávat nad shromážděními osob a pilot musí důvodně předpokládat, že nepřeletí nad žádnou nezapojenou osobou; - ostatní letadla v kategorii A1 se pouze musí vyhnout přelétávání nad shromážděními osob; - pilot je obeznámen s uživatelskou příručkou, pro C1 navíc absolvoval on-line kurz a zkoušku.
A2	- pro letadla třídy C2; - udržení bezpečné vodorovné vzdálenosti nejméně 30 metrů od nezapojených osob (lze snížit až na 5 m při nízko rychlostním režimu letu); - pilot je obeznámen s uživatelskou příručkou, absolvoval on-line kurz a zkoušku, podal prohlášení o praktickém výcviku a složil další rozšířenou zkoušku z teorie.
A3	- pro letadla třídy C2, C3, C4 nebo pro soukromé stavby letadel s MTOM do 25 kg; - udržení horizontální vzdálenosti alespoň 150 m od obytných, obchodních, průmyslových nebo rekreačních oblastí a za letu v prostoru, kde pilot důvodně předpokládá, že nebudou ohroženy do provozu nezapojené osoby; - pilot absolvoval on-line kurz a zkoušku.

Tabulka 1, Provozní omezení v podkategoriích A1-A3 [22]

### 2.2.2.2 Kategorie Specific

Specifická kategorie je určena pro piloty či provozovatele, kteří potřebují překročit některé z definovaných limitů v kategorii Open a zároveň nenaplní podmínky pro kategorii Certified [23]. UAS do specifické kategorie nespadá na základě typu, rozměru či hmotnosti, ale způsobu provozu. Kategorie vyžaduje zpracování analýzy celkových rizik letu tzv. SORA (Specific Operations Risk Assessment) ze strany provozovatele a následně její posouzení a vydání povolení ze strany ÚCL. Drony ve specifické kategorii jsou provozovány v rámci středního provozního rizika. Toto riziko bude zmírněno tak, že technické vybavení a schopnosti dronu, stejně jako schopnosti pilota, budou v souladu s jedním z následujících možností [24]:

- standardní scénář (STS – Standard scenario)
- osvědčení provozovatele lehkého bezpilotního systému (LUC – Light UAS operator Certificate)
- oprávnění k provozu vydané Úřadem

Standardní scénáře se brzy stanou součástí Dodatku 1 k příloze prováděcího nařízení ((EU) 2019/947) [19]. Předpokládá se, že se létání podle standardních scénářů bude týkat většiny menších provozovatelů ve kategorii Specific. Provozovatelé sice pro své lety nesplní kritéria provozu pro otevřenou kategorii, ale raději je upraví dle podmínek definovaných ve vybraném scénáři. Při takovém postupu pak provozovateli stačí vydat prohlášení, že tento provoz bude probíhat v souladu s pravidly daného scénáře. Takový let bude vždy prováděn do výšky 120 m AGL, a to buď v řízeném (poté je ještě třeba koordinace a schválení s příslušným stanovištěm řízení letového provozu) nebo v neřízeném (třída F nebo G) prostoru. Podmínky letu v daných scénářích se určují dle velikosti dronu a typu letu (VLOS, BVLOS). Pro zkušenější či profesionální provozovatele bude příhodnější požádat o získání osvědčení provozovatele lehkého bezpilotního systému (LUC), které umožňuje vlastní individuální posuzování provozních rizik a následně samo schvalování vlastních letů i nad rámec omezení v STS. Nestačí-li pro plánovaný let restrikce vymezené v STS a není-li provozovatel vlastníkem LUC, je nutné požádat o oprávnění k provozu u Úřadu pro civilní letectví [24].

Uvedená pravidla umožňují provoz dronů napříč veškerými státy EU, za předpokladu splnění případných lokálních podmínek konkrétního státu (zejména omezení, zákazy a požadavky v rámci geo-zón daného státu, dodatečné požadavky pro akceptování povolení vydaných pro provoz ve specifické kategorii apod.).

### **2.2.2.3 Kategorie Certified**

Certifikovaná kategorie je považována za nejvyšší z kategorií a je plánována především pro budoucí provoz UAS. Provoz v této kategorii bude z pohledu ostatních kategorií nejrizikovější. V budoucnu lze předpokládat, že se nad našimi hlavami budou pohybovat drony, které, budou převážet osoby či jakýkoliv náklad (včetně nebezpečného). UAS spadající do této kategorie budou muset projít postupem certifikace již během samotné výroby a náročnou certifikaci budou muset podstoupit také dálkově řídicí piloti, provozní personál i samotní provozovatelé. Kategorie Certified primárně souvisí s provozem v rámci chystaného vzdušného prostoru U-space (viz. kapitola 2.4) [25] [26].

### **2.2.3 Prostory létání**

Mezi stěžejní změny pravidel provozu UAS patří nový systém zveřejňování zeměpisných zón pro bezpilotní systémy. Podstatou geo-zón zpřehlednění oblastí, v nichž je možné, nemožné nebo něčím podmíněné provozovat bezpilotní systémy. Každý členský stát Evropské unie má povinnost dané oblasti publikovat. V první fázi se jedná o zveřejnění textovou formou, avšak od 1.1.2022 se již bude jednat o přehledné digitální mapové zobrazení a datové soubory, které bude možné nahrát do navigačního systému UAS. Stávající prostory, ve kterých je létání dronů zakázáno nebo omezeno, zůstanou prozatím v zásadě zachovány. Digitalizace takových zón je nezbytná především pro služby „geo-awareness“ a „geo-fencing“, které jsou důležité pro budoucí vzdušný provoz (U-space). Tyto služby zjišťují možné porušení omezení vzdušného prostoru a upozorňují pilota či omezují let dronu. Funkce geo-awareness notifikuje možné porušení omezení vzdušného prostoru. Geo-fencing softwarově ohraničuje provoz dronu a tím zamezuje vniknutí do/z předem vymezené oblasti [27].

### **2.2.4 Parametry prodáváných dronů**

Změna legislativy začíná u samotných výrobců dronů. Nařízení rozděluje nově vyrobené bezpilotní prostředky do kategorií (tříd) C0 – C4 podle jejich hmotnosti a výbavy. Zatímco kategorie A specifikují provozní omezení, kategorie C se týkají fyzických vlastností dronů. Kategorie provozních omezení (A) jsou přímo vázány na kategorie bezpilotních letounů (C). Výrobci musí svá bezpilotní letadla uvádět na trh v takové podobě, aby tyto požadavky splňovala. Každá kategorie má dané logo, které musí být uvedeno na výrobku a jeho obalu. Povinnost výrobního označení nabývá v platnost od roku 2022 [28] [29].

## 2.3 Přechodné období

Nová evropská pravidla pro provoz UAS, která platí od 31.12.2020, obsahují také přechodná opatření, která dávají členským státům a zúčastněným stranám dostatek času na přizpůsobení svých postupů novým regulačním rámcům dříve, než se tato nařízení použijí jako celek. V České republice se přebírají některé podmínky z původního leteckého předpisu L2, konkrétně Doplněk X, které jsou publikovány prostřednictvím opatření obecné povahy, které vydal Úřad pro civilní letectví [30]. Opatření zavádí omezený prostor LKR10 – UAS, který definuje podmínky letové činnosti ve vzdušném prostoru. Omezený prostor LKR10 – UAS vymezuje:

- prostory obecně
- řízený okrsek (CTR a MCTR)
- letištní provozní zóna (ATZ) neřízeného letiště
- registrované plochy SLZ
- zakázané prostory (LKP), omezené prostory (LKR), nebezpečné prostory (LKD) a jiným uživatelem aktivované dočasně vyhrazené prostory (TSA) a dočasně rezervované prostory (TRA)
- hustě osídlený prostor
- ochranná pásma

Evropské nařízení stanovuje, že se za bezpilotní systémy považují také modely letadel a létající hračky, které podléhají daným provozním předpisům. Díky náležité úrovni bezpečnosti dosavadního provozu modelů letadel v klubech a sdruženích dochází k zmírnění a plynulému přechodu od vnitrostátních pravidel k novému unijnímu regulačnímu rámci. Organizovaní modeláři tak mohou pokračovat ve své činnosti při dodržování dosavadních pravidel létání. Kluby a sdružení musí nejpozději do dvou let pro své provozní plochy získat oprávnění k provozu s individuálními podmínkami od ÚCL nebo provoz přizpůsobit jednotným pravidlům [31].

Změna se také týká rozdělení UAS dle váhy. V přechodném období se UAS, které nesplňují technické požadavky na třídy C0 až C4 (dle nařízení EU č. 2019/945) [28], provozují v otevřené kategorii do 31.12.2022 podle následujících podmínek:

- bezpilotní letoun s MTOM nižší než 500 g – dálkově řídicí pilot nesmí přelétávat shromáždění osob a musí létat tak, aby dle předpokladu nepřeletěl nad žádnou nezapojenou osobou, případně při neočekávaném přeletu takové osoby co nejvíce zkrátit dobu přeletu

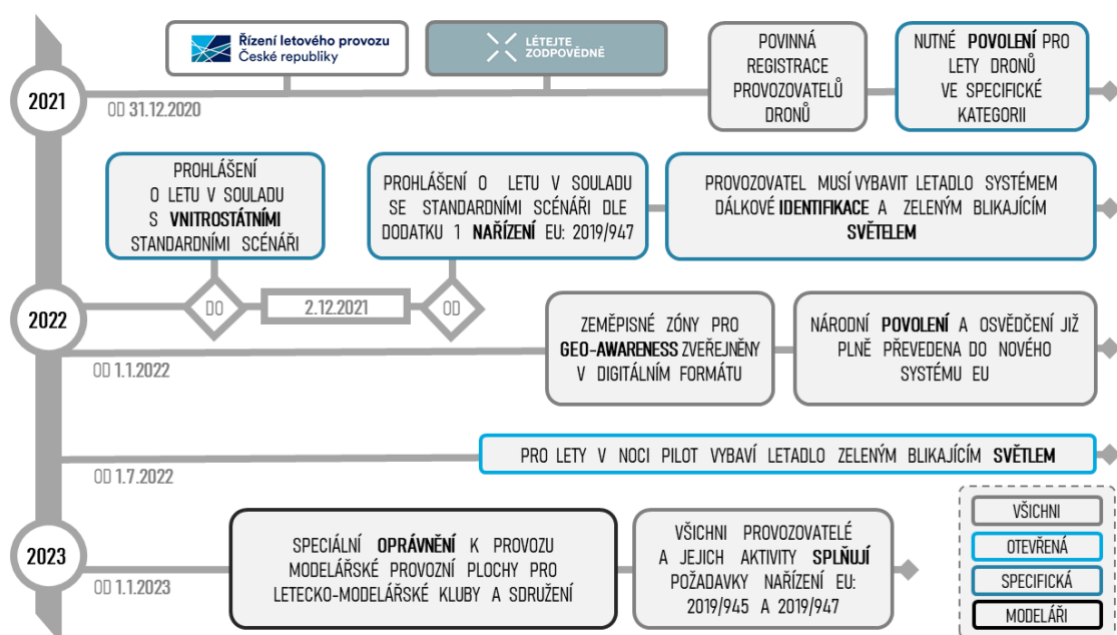
- bezpilotní letoun s MTOM nižší než 2 kg lze provozovat při zachování minimální horizontální vzdálenosti 50 m od osob, pokud dálkově řídicí pilot složil navíc i rozšířenou zkoušku z teorie
- bezpilotní letoun s MTOM nižší než 25 kg jsou provozována v prostoru, kde dálkově řídicí pilot důvodně očekává, že nebudou ohroženy žádné nezapojené osoby a v bezpečné horizontální vzdálenosti nejméně 150 m od obytných, obchodních, průmyslových nebo rekreačních prostor

V praxi rozdělení poznamenává, že přechodným obdobím bude možné s UAS do 500 g provozovat i v hustě osídlených oblastech bez zvláštních zkoušek a oprávnění. Jediná výjimka se vztahuje na shromáždění osob, kde je vždy zakázáno létat. S UAS od 500 g do 25 kg je možné létat pouze mimo hustě osídlené oblasti.

Nově vyrobených bezpilotních letadel, které již spadají do vytvořených tříd, se přechodně období vůbec netýká a řídí se pravidly Evropské Unie. Tedy UAS, které nesou štítek s označením třídy C0 nebo C1 je povoleno provozovat za podmínek pro podkategorii A1, UAS se štítkem C2 v podkategorii A2 a UAS se štítkem C3 nebo C4 v podkategorii A3.

V průběhu roku 2021 se předpokládá schválení novely zákona o civilním letectví č. 49/1997 Sb., která umožní případná další upřesnění pravidel. Přechodné období platí do 1.1.2023, od daného data budou muset všichni provozovatelé a jejich aktivity splňovat požadavky dané nařízením EU č. 2019/945 a 2019/947 [28] [19].

Veškerá pravidla a požadavky provozu týkající se přechodného období jsou shrnuta na Obrázku 7.



Obrázek 7, Přechodná období [31]



## 2.4 U-Space

Soudobá legislativa není přizpůsobena na stále častější průmyslové užití dronů, a proto agentura EASA představila plán vzdušného prostoru U-space. Tento pojem lze definovat jako soubor nových služeb a specifických postupů určených k podpoře bezpečného a efektivního přístupu do vzdušného prostoru nejen pro drony, ale všech uživatelů společného vzdušného prostoru. Zavedením daného prostoru tak bude možné bezpečně realizovat lety, které za dnešních pravidel není možné provést. U-space bude zajišťovat plynulý provoz UAS všech typů (VLOS i BVLOS) napříč všemi kategoriemi, v každém provozním prostředí a ve všech druzích vzdušného prostoru (řízený i neřízený), aniž by bylo nutné uplatňovat restriktce pouze na provoz ve velmi nízkých výškách. Územní určení každého U-space prostoru bude záležet na konkrétním členském státu EU [26].

Pro tento nový druh provozu, budou vyžadována nová pravidla a postupy, zejména pak autorizační služba pro drony (elektronická on-line verze podáváníí letového plánu) a identifikace za letu všech uživatelů takového prostoru. Nové služby budou spoléhat především na vysokou úroveň digitalizace a automatizace funkcí, které budou součástí samotného dronu, nebo pozemní infrastruktury. Jedná se např. o BVLOS lety či autonomní lety UAS.

V rámci vzniku U-space je chystáno zřízení dvou nových subjektů, které budou mít na starost správu daného prostoru – Common Information System Provider (CISP) a U-space Service Provider (USSP). Každý prostor U-space bude pod správou právě jednoho CISP, zatímco v něm může poskytovat své služby neomezený počet USSP. Provozovatelé UAS komunikují výlučně s některým USSP, přičemž úlohou CISP bude synchronizovat data mezi všemi USSP a dalšími institucemi, jako je například ŘLP [32].

Jak CISP, tak USSP musí být certifikovány. Zatímco CISP bude mít exkluzivní dohodu s příslušným členským státem pro každý jednotlivý U-space, USSP budou moci libovolně působit ve všech U-space napříč Evropskou unií.

Pro vstup do U-space budou muset provozovatelé dronů využívat služby jednoho USSP dle jejich výběru. Předpokládá se, že služby USSP budou zpoplatněny. Cílem těchto služeb je vytvořit bezpečný vzdušný prostor pro všechny jeho účastníky a umožnit pokročilejší letové operace s drony.

## 3 Základní části bezpilotního prostředku

V této kapitole jsou podrobněji vysvětleny základní komponenty, ze kterých jsou bezpilotní prostředky sestaveny. Složení komponentů se liší podle typu UAV a způsobu jejich využití. Rozdílné součástky vyžaduje sestavení multikoptéry se zavěšeným gimbaelem pro profesionální záběry, samokřídlo určené pro mapování a sběr dat či jednoduchý model letadla pro rekreační létání.

### 3.1 Rám dronu

Základním prvkem každé multikoptéry je rám, který drží všechny její části pohromadě. Pokud je UAV prostředek typu křídlo či hybrid, poté mluvíme o trupu letounu. Typ rámu určuje počet ramen a motorů, které mohou být uchyceny, nosnost, případně celkovou vzletovou hmotnost stroje, která bývá většinou uváděna výrobcem.

Ramena slouží jako spojnice uchycených motorů se základním celkem systému. Jejich konstrukce je směřována tak, aby výsledný tvar a rozměr byly co nejsymetričtější. Pro zajištění letové stability se soustředí celková hmotnost do geometrického těžiště systému. U větších modelů se pro snadnější manipulaci využívají ramena skládací, které se připevňují k tělu za pomoci zámků z kompozitních materiálů. Nedojde tak k poškození složených ramen a systém je mnohem kompaktnější. Ramena jsou vyráběna z plastu nebo z kompozitních materiálů, nejčastěji uhlíková vlákna s vhodným pojivem. U dražších modelů se můžeme setkat se slitinou hliníků a ušlechtilými kovy. Výběr vhodného materiálu vždy závisí na konkrétním účelu bezpilotního prostředku.



Obrázek 8, Rám hexakoptéry DJI550 [33]

## 3.2 Motory

Elektrické motory se rozdělují na stejnosměrné a střídavé. Pro dnešní využití v modelech letadel se především používají motory označované jako BLDC (BrushLess Direct Current). Jedná se o stejnosměrné motory, přestože jsou nazývány jako „střídavé“. Výraz Brushless znamená bezkartáčový, neobsahuje tedy komutátor [34].

Motor se skládá ze statoru a rotoru. Rotor je tvořen permanentním magnetem a stator vinutými cívkami, do kterých střídač vytváří pulzy tak, aby se motor otáčel. Kvůli absenci mechanického komutátoru není motor schopný provozu bez regulátoru otáček.

Obecně platí, že čím větší je bezpilotní prostředek, tím větší musí být použité elektromotory pro dosažení dostatečných otáček motoru a kroutícího momentu. Při použití výkonnějších motorů je také nutné adekvátně zvětšit kapacitu pohonného akumulátoru a vhodně vybrat vrtuli se správnými rozměry pro dosažení nejlepšího letového výkonu.

Mezi hlavní charakteristiky pro výběr vhodného motoru patří [1]:

- průměr v mm (na tomto parametru je závislý kroutící moment)
- výška v mm
- hmotnost
- rozsah napětí (počet Li-Pol článků)
- počet otáček za minutu na 1 V při nezatíženém chodu (parametr KV)
- doporučené proudové zatížení regulátoru
- počet pólů/vinutí
- výkon
- výrobcem doporučená velikost vrtulí



Obrázek 9, Motor BLDC MN2212 výrobce T-Motor [35]

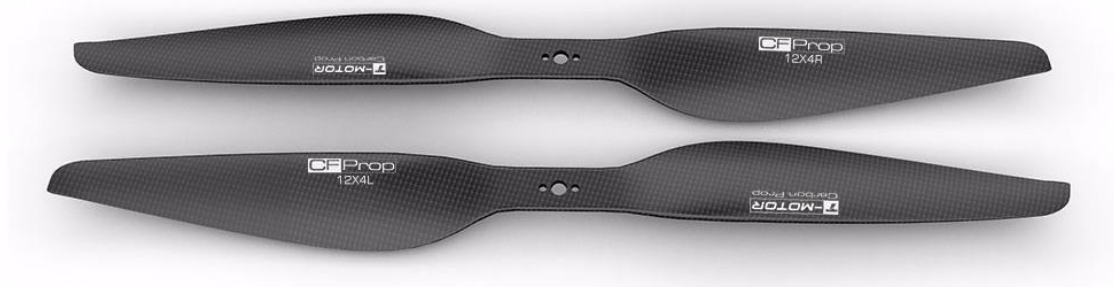
### 3.3 Vrtule

Vrtule je speciálně tvarované zařízení, které slouží pro přeměnu rotačního pohybu na tah či naopak. Zvláště pro použití v multikoptérech se vyrábí levotočivé a pravotočivé vrtule, které se prodávají v párech. Bez těchto párů vrtulí by žádná multikoptéra nemohla správně vzlétnout. Levotočivé vrtule se značí CCW (Counter ClockWise), ty se otáčejí proti směru hodinových ručiček. Pravotočivé značíme CW (ClockWise), tedy po směru hodinových ručiček [36].

Charakteristika vrtule je dána dvěma hlavními parametry, průměr a stoupání, které se udávají v palcích. Stoupání určuje vzdálenost, o kterou se vrtule posune ve směru svého působení za jednu otáčku okolo svého středu. Čím je vrtule plošší, tím je menší její stoupání a naopak. Dalším parametrem je centrální otvor pro hřídel. Vrtule je pevně spojena s motorem, je tedy zapotřebí zjistit, jaký průměr má hřídel motoru, případně jaké adaptéry lze použít. Pro spojení se využívá unašeč nebo přímé uchycení na plášť motoru šrouby.

Vrtule jsou vyráběny z velké škály materiálů. Mezi nepoužívanější materiály patří dřevo, plast a uhlíkový kompozit. Každý zde zmíněný materiál má své pro a proti. Dřevo je nejstarší používaný materiál pro výrobu vrtulí, jsou lehké a pro zajištění pevnosti mívají více klenutý profil, jejich konce se však kvůli křehkosti použitého dřeva častěji lámou. Plastové vrtule patří mezi nejnevhodnější. Jsou sice levné, avšak bývají mnohem těžší a během letu mohou měnit tvar. Při větším zatížení mohou i prasknout. Nejvhodnějším materiálem je kompozit s uhlíkovými vlákny, který je velmi lehký a pevný, díky menší setrvačnosti vrtule rychleji reagují na povelův řídicí elektroniky. Nevýhodou bývá vysoká cena [1].

V dnešní době se pro létání využívají především dvojlisté vrtule, lze se setkat i s třílistými či čtyřlistými vrtulemi. Ty se především využívají u FPV dronů pro závodní účely.



Obrázek 10, Kompozitní vrtule T-motor [37]

### 3.4 Baterie

Pro zdroj energie jsou převážně používané lithium polymerové baterie, které se značí zkratkou Li-Pol. Tento druh baterií se prakticky využívá ve všech zařízeních pro osobní použití. Baterie se skládají z jednotlivých článků, kde každý článek dodává napětí 3,7 V. Mezi výhody oproti jiným druhům akumulátorů patří nízká hmotnost, vysoká kapacita, minimální samovybitení, velká výkonnost a dlouhá životnost, která dosahuje až 2000 nabíjecích cyklů. Jejich výkon je na druhé straně vykoupen velkou náročností na obsluhu. Baterie jsou velice náchylné na změnu teplot, při nízkých teplotách dochází ke snížení výkonu baterií, zatímco při vyšších teplotách mohou i explodovat. Dále je důležité správné skladování baterií, nesmějí být delší dobu zcela nabité či naopak příliš vybité. Pokud klesne napětí článku pod 2,7 V, dojde k nenávratnému poškození baterie. Proto je důležité pravidelně proměřovat jednotlivé články. Další nevýhodou je pořizovací cena, která při vyšším počtu článků a vysoké kapacitě dosahuje řádu tisíců korun.

Příklad a popis Li-Pol akumulátoru (Obrázek 10) [38]:

1. **Typ akumulátoru**
2. **Celkové napětí (V)** – udává napětí všech článků ( $3,7 \text{ V} \times \text{počet článků}$ )
3. **Počet článků (S)** – udává počet článků a jejich vzájemné zapojení, písmeno S značí sériové zapojení
4. **Kapacita akumulátoru (mAh)** – udává proud, který je schopný dodávat po dobu jedné hodiny
5. **Maximální vybíjecí proud (C)** – vynásobením C a kapacity akumulátoru dostaneme maximální povolenou rychlost velikost vybíjecího proudu
6. **Silový konektor** – slouží pro nabíjení a vybíjení akumulátoru
7. **Servisní (balanční) konektor** – vyrovnává napětí na jednotlivých článcích při nabíjení, počet vodičů je vždy dán počtem článků + uzemnění (GND)



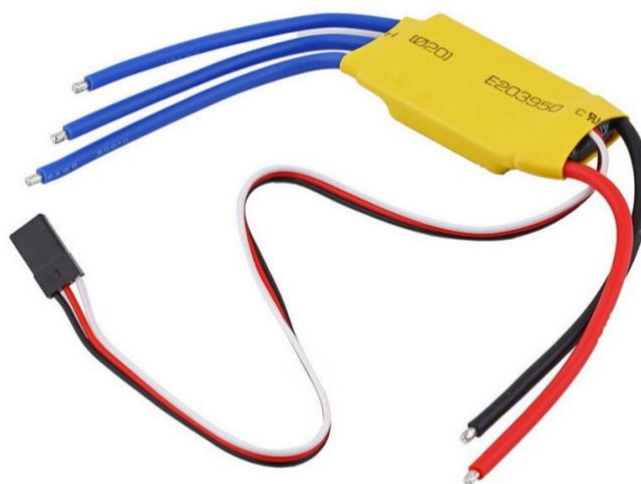
Obrázek 11, Popis Li-Pol akumulátoru [38]

### 3.5 Regulátory

Regulátor je elektronické zařízení určené pro regulování otáček stejnosměrných nebo střídavých elektromotorů. Regulátory otáček jsou označovány zkratkou ESC – Electronic Speed Controller a jsou nedílnou součástí každého bezpilotního systému [1]. Otáčky jsou regulovány na základě hodnoty PWM signálu vycházejícího z řídicí jednotky nebo z přijímače. Pulzně šířková modulace (PWM) se využívá ke generování analogového signálu za pomoci digitálního zdroje. PWM signál kóduje přenášenou hodnotu jako šířku impulsu. Větší hodnotě přenášené hodnoty odpovídá větší šířka impulsu [39].

Každý elektromotor je řízen samostatným regulátorem, který je přímo napojen na baterii a spojen s motorem třemi kabely. Pořadí zapojení kabelů definuje směr rotace u BLDC motoru a nelze jej za letu měnit. Mezi hlavní parametry patří maximální trvalý proud a rozmezí počtu připojitelných článků Li-pol baterie.

Většina dnešních regulátorů je vybavena systémem ochrany akumulátorů proti přílišnému vybití (PCO), který kontroluje stav vybití napájecích článků Li-pol baterie. Pokud by kleslo napětí článku pod určitou úroveň, regulátor upozorní pilota a zároveň sníží otáčky motoru. Pokud je stav baterie kritický, dochází k plnému omezení ovládní motorů, aby se zamezilo poškození baterie. Napájení přijímače a jiné elektroniky zůstává zachováno. Některé typy regulátorů jsou vybaveny okruhem BEC. Jedná se o integrovaný zdroj stabilizovaného napětí zajišťující rovnoměrný zdroj napájení pro přijímač a servomotory.



Obrázek 12, ESC regulátor [40]

### 3.6 Servomotor

Servomotor je krokový motor, který na rozdíl od klasického motoru umožňuje kontrolovat přesnou polohu hřídele motoru. Servomotor se skládá ze tří hlavních součástí: převodovky, řídicí elektroniky a stejnosměrného motoru [41]. Převodovka slouží k nastavení parametrů síla/rychlost a převádí velikost natočení z motoru na zpětnovazební potenciometr. Citlivost natočení servomotoru bývá dána kvalitou řídicí elektroniky. Na základě řídicího signálu dochází k natočení výstupní hřídele na požadovaný úhel. Řídicí elektronika zpracovává vstupní PWM signál, ze kterého vyhodnocuje požadované natočení, které je porovnáváno s natočením zpětnovazebního potenciometru a natáčí motorem požadovaným směrem. Po nastavení servomotor zůstává v dané pozici, dokud nedostane impuls o změně polohy. Řídicím signálem jsou impulzy od 1,25 ms do 1,75 ms pro natočení od 0° do 180°. U kvalitnějších servomotorů se impulzy pohybují od 1 ms do 2ms. Natočení servomotoru je plynulé, klasické servomotory mají minimální otočení o 2°, lepší servomotory o 1° [42].

Servomotory se podle typu řídicí elektroniky rozdělují na analogová a digitální. Digitální servomotory jsou vybaveny digitální řídicí elektronikou, ale využívají shodný vstupní signál PWM jako analogové servomotory. Z hlediska propojení s přijímači jsou oba typy servomotorů kompatibilní. Digitální servomotory zvládnou pracovat s vyšší frekvencí impulsů. Všeobecně jsou digitální servomotory přesnější a silnější, avšak mají vyšší spotřebu oproti analogovým servomotorům srovnatelné kategorie.

Některé digitální servomotory jsou programovatelné. Lze u nich naprogramovat různá nastavení jako například neutrální polohu, koncové body, rychlost pohybu a smysl otáčení. Mezi základní technické parametry servomotoru patří síla [kg.cm], napájecí napětí [V] a rychlost [s/°]. Rychlost definuje, za jak dlouho se servomotor pootočí na požadovaný úhel.



Obrázek 13, Modelářské servo [42]

### 3.7 Řídící elektronika

Zatímco pro manuální ovládání jednoduššího modelu letadla stačí prosté proporcionální řízení servomotorů a regulátorů pomocí základních ovládacích prvků RC (Remote Controller) systému, souhra výkonu motorů při řízení a stabilizaci UAV je natolik spleťtá, že tuto činnost musí realizovat palubní počítač. Tomuto počítači se říká řídicí jednotka (FC – Flight Controller). Řídící jednotka je centrálním mozkiem celé bezpilotního prostředku a reprezentuje platformu, na které běží řídicí software. Hlavní funkcí řídicí jednotky je vyhodnocování letu, přijímání pokynů z pilotova vysílače dálkového ovládání a v návaznosti na získaných datech přidělovat příkazy dalším součástem, například motorům. V reálném čase rovněž analyzuje data, která získává z různých senzorů a modulů [1].

Vyjma výpočetní jednotky se vstupními a výstupními rozhraními obsahuje alespoň tři základní senzory: gyroskop (náklon), akcelerometr (zrychlení) a magnetometr. Gyroskop slouží ke stanovení úhlové rychlosti. Akcelerometr měří velikost a směr zrychlení ve všech třech osách X,Y,Z. Magnetometr slouží k určování sil zemského magnetického pole. Tyto senzory dohromady tvoří tzv. IMU (Inertial Measurement Unit) jednotku, která slouží pro vlastní rozpoznání pohybu a stabilizace. Kvůli pokročilejší stabilizaci a možnosti automatického letu podle předem připraveného plánu bývá řídicí jednotka doplněna o barometrický výškoměr a přijímač GPS (Global Position System) [36].

Jednotka porovnává data získaná z těchto senzorů s daty od operátora a vyhodnocuje, které pohyby bezpilotního prostředku jsou žádoucí a které je potřeba korigovat a stabilizuje daný prostředek do horizontálního směru. Tento systém automatické stabilizace se nazývá ATTI mód [43]. Při daném módu nefunguje řízení pomocí GPS, ale řízení pohybu pracuje jen za pomoci IMU. Používá se na místech, kde není přístupný GPS signál. GPS pomáhá pilotovi v celém průběhu letu, pokud je signál GPS dostatečně silný a je přímý výhled na oblohu. Ve spolupráci s FC a IMU dokáže stabilizovat systém i v silném větru a udržet pozici v kterémkoliv místě s přesností na jednotky centimetrů [43].

Mezi nejznámější výrobce řídicích jednotek patří:

- DJI (A2, NAZA–M V2, N3)
- Mikro-Kopter
- 3D Robotics (PixHawk, Ardupilot)



Obrázek 14, Řídící jednotka DJI N3 [44]



### 3.8 Ovládací software

Některé řídicí jednotky jsou dodávány bez instalovaného firmwaru a poskytují tak prostor pro open source software. Open source software nebo je počítačový software s otevřeným zdrojovým kódem. Otevřenost umožňuje koncovým uživatelům a komerčním společnostem upravit zdrojový kód pro jejich vlastní přizpůsobení nebo potřebu při řešení potíží. Open source software obsahuje i licenci, která je velmi důležitá, jelikož specifikuje, jaká práva k otevřenému kódu získá a jak s nimi může nakládat jeho uživatel. Některé licence například dovolují uživatelům zdrojový kód upravovat a distribuovat. Licencovaný software s otevřeným zdrojovým kódem je většinou k dispozici bezplatně, i když to tak nutně nemusí být. Autopiloti open source firmwaru poskytují flexibilnější výběr hardware a software. Uživatelé si tak mohou autopilota upravit na základě svých zvláštních požadavků. Open source řešení je na trhu značné množství, avšak většina je poměrně primitivních a málo rozvíjených. Existuje však řada open source projektů, které jsou udržované, vyvíjené, a tudíž poměrně rozšířené.

Mezi nejvyužívanější projekty autopilotů patří Ardupilot a PX4. Ardupilot je open-source autopilot umožňující řízení multikoptér, vrtulníků, letadel s klasickou konstrukcí, vozidel či sledovačů antén [45]. U Ardupilota se doporučuje využití softwaru GCS Mission Planner či APM Planner. Mission Planner patří mezi nejvyužívanější software, jeho nevýhodou je však omezená podpora operačního systému, a to pouze na Microsoft Windows.

PX4 Pro je open-source autopilot orientovaný zejména na modely letadel s klasickou konstrukcí a multikoptér, ale je také použitelný pro modely lodí, aut i VTOL mechanismy. Začal vznikat v roce 2009 na Computer Vision and Geometry Lab na ETH Zurich. Podporuje různé HW platformy a je stále aktivně vyvíjen. Projekt byl vyvinut společně s řídicí jednotkou PX4FMU a kontrolérem PX4IO, ze kterého následně pod záštitou společností 3DRobotics a DIYDrones vznikla řídicí jednotka Pixhawk [46]. Autopilot PX4 je vyvíjen s licencí BSD 3-Clause, která umožňuje jeho modifikaci a využití pro komerční účely bez nutnosti zveřejnění zdrojových kódů.

Autopiloti obou verzí využívají ke komunikaci protokol MAVLink (Micro Air Vehicle Link), pozemní stanice smí využívat jakýkoliv software podporující tento protokol [53]. V případě PX4 se doporučuje software QGroundControl. QGC podporuje všechny počítačové operační systémy (Windows/Mac OS/Linux), lze ho také nainstalovat do zařízení podporující Android či iOS [47].

### 3.9 Dálkové ovládání

Přestože mohou být dnešní drony plně automatické, a to i včetně vzletu a přistání, z hlediska praktické použitelnosti i z hlediska legislativy musí být vybaveny prvky pro manuální ovládání. Standardně se používají systémy rádiového řízení pro modely letadel. Nejpodstatnějším prvkem systému je RC (Radio Controller) vysílač spárovaný s přijímačem. Vysílač zakóduje polohy řídicích ovladačů do samotných kanálů a prostřednictvím vysokofrekvenčního modulu a antény vysílá v některém z přidělených frekvenčních pásem elektromagnetického záření. Přijímač pracující na stejném pásmu tyto informace dekóduje a interpretuje polohu řídicích ovladačů do signálu PWM [1].

Standardně se k přijímači připojují servomotory, které ovládají řídicí plochy letadla a regulátor, který řídí otáčky motoru. Z regulátoru otáček, který zároveň disponuje regulátorem napětí (BEC), je zároveň přijímač zásobován napětím 5 V. U multikoptér je přijímač napájen přímo z řídicí jednotky. V současnosti všechny používané RC systémy pracují ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz. Před prvním použitím RC vysílače a přijímače musí dojít k takzvanému spárování. Je to proces, při kterém si obě zařízení zapamatují sériové číslo svého protějšku a následně akceptují komunikaci pouze mezi sebou. Tím je zajištěna bezpečná vazba mezi vysílačem a modelem, takže jakékoli jiné zařízení pracující na stejné frekvenčním pásmu nezpůsobí rušení.

Mezi nejznámější výrobce modelářských souprav patří Graupner, Futaba nebo Jeti. Tyto firmy nabízejí řadu modelů od jednoduchých čtyř kanálových až po komplexní počítačové systémy s desítkami ovladačů a vyspělými technologiemi zabezpečení přenosu a telemetrie. Uživatelé takového RC mohou i přijímat určité provozní informace, například počet GPS družic, stav baterií, výšku letu, vzdálenost od místa startu a mnohé další. Pro základní ovládání jednoduchého dronu stačí přenos čtyř až šesti kanálů, profesionální stroj s bezpečnostními prvky či automatickými režimy může potřebovat dvojnásobný počet.



Obrázek 15, RC vysílač a přijímač výrobce Futaba [48]

### 3.10 Telemetrie a videopřenos

Dnešní palubní elektronika umožňuje sledovat parametry letu, detailní data ze senzorů řídicí jednotky, veškeré veličiny palubní elektroinstalace, výkon motorů a teploty regulátorů, a to vše v reálném čase. Včasná reakce pilota na jakýkoli nestandardní údaj může vést k záchraně stroje. Možnosti, jak předat tyto informace z paluby dronu na zem [43] [1]:

- Systémová telemetrie, která je součástí většiny moderních PC souprav pracujících na frekvenčním pásmu 2,4 GHz
- Vizuální světelné kódy zprostředkované LED modulem na palubě
- Samostatný pár telemetrických modulů, z nichž jeden je napojený na datovou sběrnici dronu a druhý na počítač či tablet na zemi
- Telemetrická data v živém přenosu obrazu na pozemní monitor (OSD – On Screen Display)

RC soupravy umožňují buď připojení systémových telemetrických modulů externě anebo je telemetrie zabudována přímo jako neoddelitelná součást. RC přijímač u všech 2,4 GHz systémů komunikuje s vysílačem kvůli oboustrannému přeladování kanálů při narušení signálu. Není problém tento způsob komunikace využít k odesílání do vysílače i datově nenáročných telemetrických dat. Na displeji vysílače pak lze zobrazit v podstatě jakákoliv informace o právě prováděném letu. Palubní přijímač však vysílá telemetrická data zhruba s polovičním výkonem oproti RC vysílači, dosah telemetrie bývá o něco menší než dosah řídicího signálu. V závislosti na úrovni okolního rušení a vzájemné konfiguraci antén je dosah telemetrie obvykle 0,5 až 1,5 km.

Mezi základní údaje přenášené telemetricky patří: rychlost, výška, status GPS, orientace stroje, napětí pohonných akumulátorů, režim letu, odebraná kapacita akumulátorů, síla řídicího signálu či vzdálenost a směr od místa vzletu

K video přenosu obrazu slouží palubní kamera. Aktuální záběr kamery se přenáší většinou na frekvenci 5,8 GHz na pozemní monitor, který může být umístěn na dálkovém ovládní operátora kamery nebo pilota, případně na různých externích monitorech. Videopřenos je realizován přes soustavu speciálních antén na letounu vysílajících a na náhledovém monitoru operátora přijímacích. Signál je nerušený a ostrý standardně zhruba do jednoho kilometru na přímou viditelnost, poté z důvodu nízkého výkonu vysílače dochází k rušení signálu šumy a výpadky. Do záběru z kamery, respektive do náhledu v monitoru je možné též promítat dodatečné informace telemetrické údaje z letounu nebo kamery.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 Základní předpoklady pro návrh UAV

Před návrhem je důležité se zamyslet, za jakým účelem budeme letoun stavět a jaké vlastnosti by měl mít. Nelze zkonstruovat univerzální stroj, který by mohl být zároveň vhodný pro rekreační létání, závody FPV nebo pro mapování oblastí. Je klíčové stanovit si jeden konkrétní účel stavby a tomu přizpůsobit parametry letounu.

### 4.1 Velikost a stabilita

Obecně platí, že čím je letoun rozměrově větší, tím má větší nosnost a je stabilnější. Zároveň je však letoun mnohem těžší a pomalejší. Je tedy důležité náležitě vyvážit dané parametry tak, aby byl let co nejstabilnější. Stabilitu ovlivňuje celková hmotnost a její rozložení, poloha těžiště letounu, počet motorů a jejich kroučící moment, adekvátní velikost vrtulí a dostatečný přebytek výkonu. Stabilitu je možné ovlivnit i správným seřízením parametrů v řídicí jednotce. Nepochybně musí být řídicí jednotka pro danou konfiguraci i dostatečně výkonná. Při stavbě je velmi efektivní instalovat co nejvíce komponentů co nejbliže vertikální osy stroje. To znamená lehká ramena a těžký střed. Stabilní letoun tak snáze udržuje směr letu a horizontální rovinu a není výrazně citlivý na poryvy větru či řídicí povely.

### 4.2 MTOM a nosnost

Maximální vzletová hmotnost (MTOM – Maximum TakeOff Mass) je klíčový parametr pro všechny typy letadel. Udává skutečnou (při návrhu vypočítanou) maximální hmotnost letounu včetně kompletního vybavení, při které je schopný uskutečnit let. Podle Úřadu pro civilní letectví vyjadřuje hmotnostní limit pro bezpilotní letadla v dané kategorii, zatímco vzletovou hmotností se rozumí aktuální celková hmotnost včetně vybavení, baterií a případného nákladu před zahájením vzletu. Vzletová hmotnost nesmí být vyšší než maximální vzletová hmotnost.

Nosnost neboli hmotnost užitečného zatížení je hodnota, kterou je letoun schopen unést. U bezpilotních prostředků je nosnost důležitá zejména při výběru záznamové techniky, FPV kamery nebo gimbalu. Nosnost bývá standardně kolem 1/3 MTOM, při požadavku na dlouhou letovou dobu bývá tato hodnota mezi 1/4 a 1/5 MTOM [1].

## 4.3 Doba letu a rychlost

V úvahách o letové výdrži je potřeba vycházet z určitých souvislostí:

- čím menší otáčky motoru, tím méně použitého proudu, a tím delší výdrž baterie
- čím menší otáčky chceme použít, tím větší musí být vrtule pro dostatečný vztlak
- čím větší vrtule, tím je za potřebí větší kroutící moment
- motory s velkým kroutícím momentem potřebují větší napětí
- baterie s větším napětím (s větším počtem článků) jsou buď těžší při stejné kapacitě anebo jsou stejně těžké, ale mají menší kapacitu
- nárůst hmotnosti způsobí větší proudový odběr a zkrácení doby letu, případně se zkrátí doba letu při použití baterií o menší kapacitě

Při výběrů komponentů dle MTOM se tak dostáváme do uzavřeného kruhu. Vzhledem k tomu, že baterie bývá jednou z nejtěžších komponentů celého UAV prostředku a se zvyšující kapacitou přímo stoupá i její hmotnost, musí se tedy zvolit silnější motory. Silnějšími motory narůstá proudový odběr a dochází k rychlejšímu vybíjení baterie a snižuje se doba letu. Ideální vyvážení MTOM, výběru baterie a motorů není úplně jednoduchou záležitostí. Základním parametrem, který je nutný dodržet, je poměr minimálního tahu motorů oproti MTOM. Minimální tah musí být v poměru alespoň 2:1.

Rychlost letu a živost ovládání je s dobou letu v příkrém rozporu:

- čím rychlejší otáčky má motor, tím rychleji může stroj letět
- motory s vysokými otáčkami mají malý kroutící moment, a je tedy zapotřebí použít menší vrtule
- při vysokých otáčkách má motor velký proudový odběr, ale stačí mu menší napětí pohonné baterie, tedy méně článků
- baterie s menším počtem článků může mít při stejné hmotnosti vyšší kapacitu

## 5 Koncepční návrh UAV

Prvním krokem při konstrukci vlastního UAV prostředku je určení jeho typu a tvaru (konfigurace motorů) s ohledem na jeho využití. Požadavkem této práce je postavit letoun pro environmentální účely, tedy takový letecký prostředek, který bude sloužit pro sběr dat a mapování terénu. Hlavními podmínkami konstrukce je vytvořit takový letoun, který bude schopný vzletu z jakéhokoliv místa, bude co nejdéle mapovat zkoumanou oblast a sbírat telemetrická data. Při návrhu je důležité také zohlednit snadnou montáž a demontáž a snadnou přepravu například automobilem.

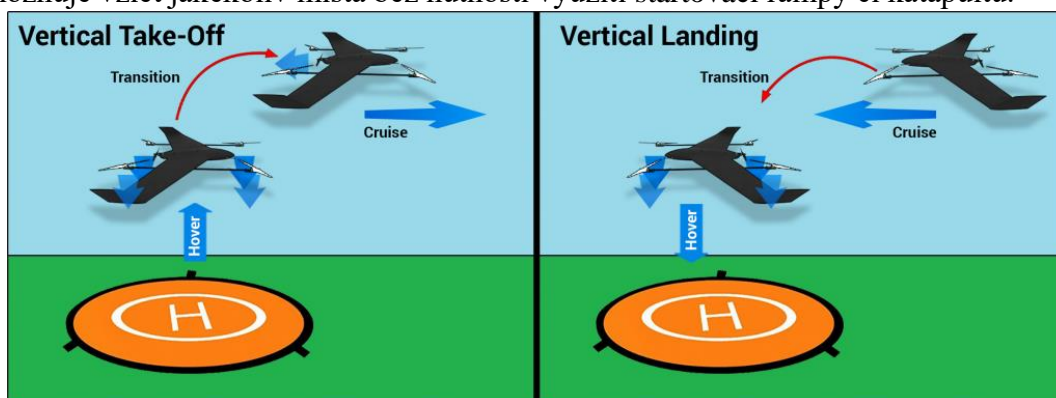
### 5.1 Volba koncepce bezpilotního prostředku

Ze získaných poznatků o modelech bezpilotních prostředků byla zvolena koncepce typu Hybrid (viz. kapitola 1.2.1.3). Hlavním důvodem výběru je kombinace výhod multikoptéry a fixního křídla, spojuje tedy dobrou manévrovatelnost, možnost startu v komplikovaném prostředí a dlouhou výdrž.

Hybridních VTOL strojů je nepřehledné množství, konkrétně však byl vybrán model typu Quad-plane. Quad-plane využívá sadu motorů pro zdvih a sadu motorů či jeden motor pro horizontální let, konkrétně se bude jednat o spojení 4 motorů a 1 motoru tlačného [49].

Ve vzletové fázi jsou vypnuté motory pro horizontální let a po přechodu jsou využívány motory pro vertikální let. Pouze při přechodové fázi jsou využívány obě sady motorů, z toho důvodu probíhají přechodové fáze značně hladce. Vzlet a přistání Quad-plane modelu je zobrazen na Obrázku 16 [50].

Nevýhoda modelu spočívá ve vyšší hmotnosti z důvodu velkého počtu motorů, z nich je po většinu času část z nich nevyužitá. Model byl však zvolen především z důvodu, že umožňuje vzlet jakékoliv místa bez nutnosti využití startovací rampy či katapultu.



Obrázek 16, Schéma vzletu a přistání VTOL modelu [50]

## 5.2 Výběr komponentů

### 5.2.1 Kostra

Základem konstrukce je fixní křídlo s jedním tlačným motorem. Pro práci byl vybrán letoun Skywalker X8, který byl dostupný z laboratoře Ústavu aplikované informatiky. Skywalker X8 model takzvaného samokřídla bez ocasních ploch, u kterých příčnou stabilizaci zajišťují winglety na koncích křídel a funkce výškovky a směrovky obstarávají velká křídélka zvaná elevony. Využívá se především jako FPV letoun nebo pro mapování oblastí. Letoun se prodává v konfiguraci Frame Kitu, která značí stavebnici rámu. Obsahuje pouze trup, křídla, winglety, spojovací trubice a spojovací materiál [51].

Rozpětí křídel:	2120 mm
Délka trupu:	790 mm
Plocha křídel:	80 dm <sup>2</sup>
Váha:	880 g
Vzletová hmotnost:	3200-3500 g

*Tabulka 2, Parametry letounu Skywalker X8 [51]*

K uchycení motorů pro vertikální let se využijí čtvercové uhlíkové trubky o rozměrech 15x15x1000 mm. Trubky z uhlíkových vláken jsou velmi lehké a zároveň pevné. Jedná se o velmi spolehlivý materiál. Ramena se připevní k trupu letounu za pomoci spojovacího materiálu. Součástky sloužící pro uchycení motorů na ramena a podvozek se vytvářejí za pomoci CAD softwaru a následně vyrobí 3D tiskárně. Kompletní návrh modelu je vyobrazen na Obrázku 17, který byl vymodelován v programu Sharp3D.



*Obrázek 17, CAD model navrhovaného letounu*



## 5.2.2 Ovládání

Pro manuální ovládání byl použit RC vysílač Graupner MC-20 z důvodu jeho dostupnosti a spolehlivosti. Graupner MC-20 HoTT disponuje 12 řídicími funkcemi a technologií Graupner HoTT 2,4 GHz, která zaručuje vysokou spolehlivost díky obousměrné komunikaci mezi vysílačem a přijímačem s integrovanou telemetrií a okamžitými odezvami. Vysílač umožňuje pokročilé ovládání široké škály RC modelů. RC souprava umožňuje uložení do paměti 24 modelů. Možné je rovněž ukládání dat telemetrie a rozšíření paměti na modely pomocí microSD paměťové karty. Displej zajišťuje kontrolu nad parametry jako jsou typ modelu, časovače a napětí baterie. Vysílač umožňuje naprogramování Fail-Safe funkce pro každý kanál zvlášť [52].

Pro příjem signálu z vysílače bude v modelu umístěn dvanácti kanálový přijímač Graupner HoTT GR-24 s dvojitou všesměrovou anténou. Přijímač pracuje v širokém rozsahu napětí (je schopen činnosti do 2,5 V).

Počet kanálů:	12
Modulace:	2.4 GHz FHSS
Napájecí napětí:	(2,5V) 3,6-8,4 V
Proudový odběr:	70 mA
Dosah:	4000 m
Rozměr:	46 x 31 x 14 mm
Hmotnost:	16 g

Tabulka 3, Parametry přijímače Graupner HoTT GR-24 [52]



Obrázek 18, RC souprava Graupner [52]

### 5.2.3 Řídící jednotka

Při výběru řídicí jednotky, je nutné zhodnotit požadavky, které od autopilota očekáváme. V případě VTOL letounu je potřeba, aby autopilot umožňoval automatický let po předem definované trase, stabilizaci polohy či další módy při mapování dané oblasti. Po zvážení byla vybrána řídicí jednotka Pixhawk 2.1, který se vyrábí pod názvem Hex Cube Black [53].

Pixhawk je open-source hardware autopilota pro řízení modelu. Byl vytvořen spojením dvou modulů předchozího modulárního systému, konkrétně PX4FMU (Flight Management Unit) a PX4IO (Input/Output modul). Pixhawk může řídit až 14 servomotorů či motorů pomocí PWM výstupu, z nichž 8 je možné v případě problému s autopilotem ovládat ručně. Prostřednictvím dalších interface (UART, I2C, CAN, SPI) je možné další periferní zařízení. Systém obsahuje rezervní procesor, který umožňuje manuální ovládání letounu v případě výpadku hlavního systému a obnovení jeho funkce [54] [36].

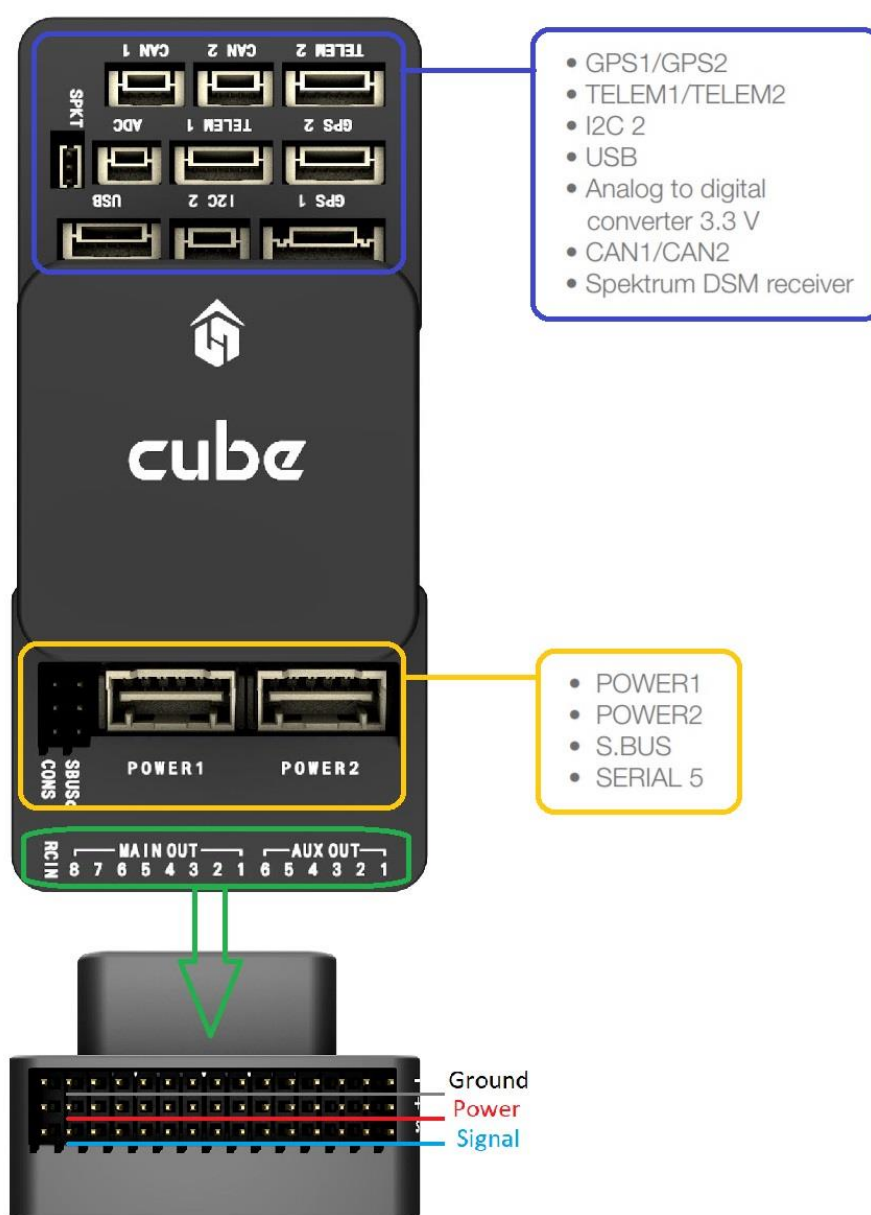
Jednotka podporuje napájení až ze 3 nezávislých zdrojů, mezi kterými dovede přepínat v případě výpadku. Pro ovládání letounu je možné připojit RC přijímače přes standardní rozhraní (PPMsum, S.BUS, Spektrum DSM...). Pro záznam logů letu je k dispozici slot na microSD kartu, na kterou je možné zaznamenávat i data o velkých frekvencích po dlouhý čas. Stahovat data a provádět nastavení jednotky je možné přes microUSB konektor. Řídící jednotka má oddělený systém IMU od FMU, který účinně snižuje rušení senzorů [36].

Procesor	32bit STM32F427 Cortex M4 core s FPU
Taktování	168 MHz / 252 MIPS
RAM paměť	256 KB
Flash paměť	2 MB
Failsafe co-procesor	32 bit STM32F103
Trojitý redundantní systém	3x gyroskop
	3x akcelerometr
	3 x magnetometr
	2 x barometr

Obrázek 19, Parametry Pixhawk 2.1 [53]

### 5.2.3.1 Rozmístění výstupů na řídicí jednotce

Řídicí jednotka obsahuje 3 základní části pro zapojení všech komponentů elektroinstalace. Přehled konektorů je zobrazen na Obrázku 20. Zelená část představuje zapojení 8 hlavních servomotorů či motorů do portů MAIN OUT, 6 pomocných servomotorů či motorů AUX OUT a připojení přijímače do portu RC IN. Žlutá část umožňuje pomocí POWER 1 a 2 připojit až 3 zdroje napájení. V modré části lze připojit skrz GPS1/GPS2 nebo konektorů CAN1/CAN2 jednotku GPS. K připojení telemetrie slouží TELEM1/TELEM2. USB konektor slouží pro připojení Buzzeru, Z boku Cube kostky se nachází microUSB konektor k připojení k PC a slot na microSD kartu. SPKT výstup je pouze pro přijímač výrobce Spektrum [53] [54].



Obrázek 20, Přehled portů na řídicí jednotce Pixhawk [53]

## 5.2.4 GPS

GPS modul Here 2 je nová verze založená na GPS jednotce Here GNSS. Here 2 má oproti předchozí verzi přesnější určování polohy, rychlejší odezvu a barevná LED světla určují viditelnou indikaci stavu UAV. GPS jednotka je určena pro práci s Pixhawk2.1, ale je také kompatibilní s jinými open-source řídicími jednotkami. Here 2 disponuje kompasem, gyroskopem, akcelerometrem a barometrem [55].

### Hlavní funkce:

Souběžný příjem až 3 GNSS (GPS, Galileo, GLOSNASS)

Špičková citlivost navigace -167 dBm

Zabezpečení a ochrana integrity

Podporuje všechny satelitní rozšiřující systémy

Pokročilá detekce rušení a spoofingu



Obrázek 21, GPS Here 2 [55]

## 5.2.5 Software řízení

Při řešení otázky výběru správné kombinace autopilota a daného softwaru se výběr zúžil na 2 možnosti: Ardupilot se softwarem Mission Planner a PX4 s QGroundControl. Nakonec byla zvolena kombinace PX4 s QGC, jelikož Mission Planner podporuje pouze platformu Windows a mé primární zařízení běží na MacOS. Daný software disponuje lepším a uživatelsky přívětivým rozhraním. Další výhodou je možnost instalace do tabletu. Komunita open source kolem hardwaru Pixhawk a autopilota PX4 je popsána jako největší průmyslová komunita podporující vývoj v oblasti dronů. PX4 je součástí Dronecode. Projekt Dronecode je projekt sponzorovaný Linux Foundation, který pracuje na vybudování společné open source platformy pro vývoj UAV. V posledních několika letech prošel mnoha změnami, ale dnes slouží jako struktura řízení pro komponenty celkové platformy, kde dochází ke skutečnému vývoji projektu. Mezi tyto součásti patří systém PX4, komunikační sada MAVLink a uživatelské rozhraní QGroundControl pro řízení letu, plánování misí a konfiguraci. Veškerý hardware a software je otevřený a volně k dispozici komukoli na základě licence BSD. Kompletní kód této platformy je stále velmi aktivně vyvíjen, přičemž aktuální verzi kódu lze vždy nalézt v online verzovacím systému GitHub [56]. PX4 nabízí optimalizované API a SDK pro vývojáře pracující s integracemi. Všechny moduly jsou samostatné a lze je snadno vyměnit za jiný modul bez jakýchkoliv úprav jádra.

Řídící jednotka podporuje nahrání své vlastního firmwaru, který se vytváří kompilací zdrojových kódů, které jsou v různých jazycích. Hlavní letový kód je napsán v C++, podpůrné nástroje jsou nejčastěji psány v jazyku Python. Detailní návod včetně příkladů pak lze nalézt na webových stránkách projektu PX4 [46].

Se systémem lze komunikovat i za pomoci příkazové řádky. Tato interakce se hodí především pro vývoj nových aplikací a ladění těch stávajících nebo pro automatické spuštění systému při instalaci v letadle. Využívá se tzv. startup skriptů, kde jsou jednoduše sekvencně seřazované požadované příkazy, které se vykonají okamžitě po startu desky (připojení napájení). PX4 obsahuje několik různých přednastavených skriptů, kdy uživatel pouze zvolí požadovanou platformu a systém sám spustí vše potřebné.

Pro účely konstrukce bezpilotního prostředky nám bude stačit základní nastavení řídicí jednotky, které se provádí prostřednictvím pozemní stanice, tedy počítačového software QGroundControl, který umožňuje:

- nahrát firmware autopilota do řídicí jednotky
- nastavit parametry autopilota
- naplánovat misi vytyčením bodů na mapě
- stáhnout a analyzovat záznamy letu z flash paměti
- přijímat informace ze senzorů desky, které graficky zobrazuje

Konkrétní nastavení bude vysvětleno v kapitolách níže.

Auto pilot může být provozován v několika letových módech, které mohou být velmi nápomocné při samotném letu. Každý z režimů je jiným způsobem ovládan, poskytuje jiné úrovně stabilizace. Různé režimy mohou být ovládány za pomoci vysílačky, jiné jsou ovládány příkazy z pozemní stanice. Mezi nejčastější režimy patří [36] [57]:

- MANUAL
- STABILIZED
- AUTO
- ACRO
- ALTITUDE
- POSITION
- HOLD
- RETURN (RTL)
- FOLLOW ME
- MISSION

### **Režim Manual**

V tomto režimu je letoun řízen vysílačkou a software v pozemní stanici nezasahuje do letu, kromě případu ztráty signálu s vysílačkou.

### **Režim Stabilized**

Režim nevyužívá GPS, je plně ovladatelný pomocí vysílače. Vnější vlivy mají vliv na pohyb letounu. Řídící jednotka udržuje stabilizaci letounu.

### **Režim Auto**

V tomto režimu letoun vykonává misi, sestávající z jednoho a více příkazů. Nejčastější je použití navigačních příkazů, které mají za úkol dovést letoun na dané souřadnice. Celý let musí být naprogramován dopředu.

### **Režim Acro**

Režim, který je nejtěžší na řízení letounu. Vše, včetně výšky, musí být neustále ovládáno.

### **Režim Altitude**

V daném režimu udržuje barometr stálou výšku, když je knipl plynu mezi 40 % a 60 % svého rozsahu. Stoupání a klesání je ovládáno pohybem kniplu mimo daný rozsah. Pohyb ostatních směrů je plně ovladatelný.

### **Režim Position**

Letoun udržuje stálou pozici pomocí GPS souřadnic a je možné měnit tuto pozici. Výška je kontrolovatelná manuálně pohybem kniplu, nevyužívá se tedy barometr.

### **Režim Hold**

Režim způsobí, že se letoun zastaví a vznáší se ve své aktuální poloze a nadmořské výšce.

### **Režim RTL**

V režimu Return To Launch se letoun vrací do pozice základny. Výchozí pozicí základny je místo, kde GPS modul poprvé získal souřadnice autopilota. Pozici základny je možné kdykoliv změnit příkazem z pozemní stanice.

### **Režim Follow me**

Letoun sleduje pohybující se objekt, které je připojené pomocí bluetooth nebo telemetrie k řídicí jednotce.

### **Režim Mission**

Umožňuje vytvoření letového plánu v pozemní stanici, autopilot následně provede let po definované trati.

## 5.3 Výběr koncepce pohonu

Pro daný systém je nejadekvátnější volbou pohonu použití střídavých elektromotorů s vhodnými vrtulemi a ESC regulátory z důvodu snadného a přesného ovládání. Jako zdroj energie poslouží Li-Pol baterie, které jsou nejvyužívanějším typem akumulátorů pro napájení daných modelů. Základem je zvolit tu nejlepší možnou variantu elektromotorů, vrtulí a baterií.



Obrázek 22, Schéma pohonu

### 5.3.1 Výpočet hmotnosti

Při návrhu elektromotorů je zapotřebí znát celkovou hmotnost letounu včetně všech částí. U výpočtu hmotnosti lze vycházet z podobných letounů a vybraných komponentů. Primární hmotnost, která je předem známa je hmotnost zvoleného fixního křídla Skywalker X8, ostatní hmotnosti se odvíjí dle vybraných částí, které jsou rozvrženy na předpokládanou hmotnost celku. Odhadovaná hmotnost je zhruba 3,5 kg na základě analýzy srovnatelných letounů a vybraných komponentů. Z udávané hmotnosti je možné navrhnout potřebné elektromotory, které by měly mít přibližně dvojnásobný tah při plném výkonu, tedy poměr 2:1 (tah/hmotnost). Poměr 2:1 je doporučený pro bezproblémový let a dobrou manévrovatelnost při zhoršení povětrnostních podmínek. U sportovních modelů by měl být daný poměr ještě větší, u zvoleného modelu není nezbytně nutné tento poměr přesně dodržet. Potřebný tah se vždy rozvrhne mezi jednotlivé elektromotory.

### 5.3.2 Volba elektromotorů

Prvně se nutně se zaměřit na výběr elektromotorů pro vertikální vzlet, jelikož jsou primárními motory a závisí na nich přesný start letounu. Základním výpočtem je potřebný tah motorů.

#### Potřebný tah

T...potřebný tah [g]

T<sub>1</sub>...potřebný tah jednoho motoru [g]

m...hmotnost [g]

$$T = 2 * m = 2 * 3500 = 7000 \text{ g}$$

$$T_1 = \frac{T}{4} = \frac{7000}{4} = 1250 \text{ g}$$

Pro vertikální vzlet byly vybrány střídavé elektromotory od výrobce T-motor, konkrétně MN3510 KV700. Jedná se o velmi spolehlivé motory s velkým výkonem.

Vnitřní odpor	50 mΩ
Průměr hřídele	4 mm
Průměr statoru	35 mm
Výška statoru	10 mm
Počet článků	3-4 S
Max. trvalý výkon	555 W
Max. trvalý proud	25 A
Volnoběžný proud	0,5 A
Hodnota KV	700
Hmotnost bez kabelů	97 g

Tabulka 4, Parametry motoru T-motor MN3510 KV700 [35]

Rozměr veličiny KV odpovídá vztahu:

$$KV = \frac{n}{U}$$

n...počet otáček za minutu [ot./min]

U...elektrické napětí [V]

Níže je uvedena charakteristika motoru převzatá přímo od výrobce v závislosti na použitém napětí a určité vrtuli.

Název	Napětí [V]	Vrtule	Plyn	Proud [A]	Výkon [W]	Tah [g]	RPM	Účinnost [g/W]
T-motor MN3510 KV 700	11,1	13*4,4	50 %	2,9	32,19	400	3800	12,43
			65 %	5,6	62,16	650	4900	10,46
			75 %	7,9	87,69	830	5300	9,47
			85 %	10,5	116,55	1000	6000	8,58
			100 %	12,6	139,86	1100	6400	7,87
		14*4,8	50 %	4,1	45,51	550	3500	12,09
			65 %	7,7	85,47	890	4500	10,41
			75 %	10,7	118,77	1060	4900	8,92
			85 %	14,5	160,95	1300	5500	8,08
			100 %	17,3	192,03	1460	5800	7,60



T-motor MN3510 KV 700	14,8	12*4	50 %	3,8	56,24	580	5000	10,31
			65 %	7,4	109,52	880	6300	8,04
			75 %	10,3	152,44	1100	7300	7,22
			85 %	14	207,2	1360	7700	6,56
			100 %	16,8	248,64	1600	8300	6,44
		13*4,4	50 %	4,7	69,56	730	4900	10,49
			65 %	9	133,2	1120	6100	8,41
			75 %	12,3	182,04	1400	6800	7,69
			85 %	16	236,8	1600	7400	6,76
			100 %	19,4	287,12	1800	7850	6,27

Tabulka 5, Charakteristika motoru MN3510 KV700 [35]

#### Poměr tah/hmotnost

Tr...maximální reálný tah [g]

Tr1...maximální reálný tah jednoho motoru [g]

$$T_r = 4 * T_{r1}$$

Napětí [V]	Vrtule	Tah Tr[g]	Poměr Tr/m
11,1	13*4,4	4400	1,257
	14*4,8	5840	1,669
14,8	12*4	6400	1,829
	13*4,4	7200	2,057

Tabulka 6, Porovnání tahu motoru v kombinaci různých vrtulí

Výsledný poměr vyšel nejlépe v kombinaci napětí 14,8 V a rozměr vrtule 13\*4,4, jako jediný splňuje poměr 2:1. Poměr 1,83 je dosti na povážení, dal by se pokládat za záložní variantu. Zbylé varianty nedosahují zmíněných nároků.

Tlačný motor byl zvolen dle doporučení výrobce fixního křídla. Výrobce v manuálu uvádí motor 2820 KV830 v kombinaci s vrtulí 12\*6–13\*8 v MTOM 3500 g, čemuž odpovídají předběžné výpočty, a tudíž není potřeba motor měnit.

Průměr hřídele	5 mm
Průměr statoru	28 mm
Výška statoru	20 mm
Počet článků	3-6 S
Max. trvalý výkon	800 W
Max. trvalý proud	43 A
Volnoběžný proud	1,2 A
Hodnota KV	830
Hmotnost bez kabelů	132 g

*Tabulka 7, Parametry motoru T-motor AT2820-7 KV830 [58]*

Pro dané elektromotory bylo zapotřebí vybrat vhodný ESC regulátor. Motor pro vertikální let má podle tabulky výrobce při napětí 14,8 V odběr 19,4 A, je vhodné zvolit regulátor alespoň s dvojnásobným konstantním odběrem. Byl vybrán ESC regulátor T-motor AIR 40 A 6 S, který je doporučován výrobcem pro motor MN3510.

Konstantní proud	40 A
Špičkový proud	60 A
Počet. článků	2-6 S
BEC	Ne
Velikost	56 mm x 25 mm x 11 mm
Váha	26 g

*Tabulka 8, Parametry ESC regulátoru AIR 40 A [59]*

Pro tlačný motor je použit ESC regulátor T-motor T60 A.

Konstantní proud	60 A
Špičkový proud	80 A
Počet. článků	2-6 S
BEC	Pentium 60 A 3A/5V
Velikost	70 mm x 31 mm x 14 mm
Váha	60 g

*Tabulka 9, Parametry ESC regulátoru T60 A [60]*

### 5.3.3 Výběr baterie

Výběr akumulátorů závisí na mnoha faktorech. Čím větší je kapacita akumulátoru, tím je větší doba letu. Čím je větší kapacita akumulátoru, tím je vyšší hmotnost letounu. Čím větší je hmotnost letounu, tím je vyšší proudový odběr. Čím vyšší proudový odběr, tím se snižuje doba letu. Doba letu je nepřímo úměrná hmotnosti letounu [1]. Při výběru se tak lze dostat do neustálého kruhu, ze kterého lze vyjít jen určitým kompromisem. Výběrovým kritériem pro akumulátory je kapacita, výstupní napětí a maximální vybíjecí proud.

Jako palubní zdroj elektrické energie byla nejdříve zvolena lithium–polymerová baterie Tattu 16000 mAh 4 S 15 C, která dodává napětí 14,8 V. Při dalším návrhu bylo zjištěno, že model letounu nelze správně vyvážit jen s jednou baterií o velké kapacitě. Řešením bylo rozdělit danou kapacitu na 2 baterie. Bohužel se nepodařilo sehnat čtyř článkové baterie s kapacitou 8000 mAh, proto byl zvolen alternativní typ baterie s nižší kapacitou. Baterie s nižší kapacitou zkracuje dobu letu, pro základní testování však postačí.

Konečným výběrem jsou dvě baterie Tattu 6750 mAh 4 S 25 C.

Typ akumulátoru	LiPo
Celkové napětí	14,8 V
Počet článků	4 S
Kapacita akumulátoru	6750 mAh
Maximální vybíjecí proud	168,75 A
Zatížitelnost	25 C
Hmotnost	1210 g (2 x 605 g)
Výkon	99,9 Wh

Tabulka 10, parametry akumulátoru Tattu 6750 mAh [61]

#### Napětí akumulátoru ve složení 4S1P

U...napětí akumulátoru [V]

U<sub>1</sub>...napětí jednoho článku [V]

$$U = 4 * U_{1S} = 4 * 3,7 = 14,8 V$$

#### Výkon baterie

P...výkon [W]

U...napětí akumulátoru[V]

C...kapacita akumulátoru [Ah]

$$P = U * C = 14,8 * 6,75 = 99,9 W$$

### Výpočet proudového zatížení

$I_z$ ...proudová zatížitelnost [A]

$C$ ...kapacita akumulátoru [Ah]

$I_U$ ...maximální vybíjecí proud [C]

$$I_z = C * I_U = 6,75 * 25 = 168,75A$$

### Doba letu tlačný motor

$t_h$ ...doba letu na maximální trvalý proud [min]

$C$ ...kapacita [Ah]

$I$ ...proud [A]

$$t_h = \frac{C * 60}{I} = \frac{6,75 * 60}{43} = 9,41 \text{ min}$$

### Doba letu vertikální motory

$t_v$ ...doba letu na maximální trvalý proud [min]

$C$ ...kapacita [Ah]

$I$ ...proud [A]

$$t_v = \frac{C * 60}{I} = \frac{6,75 * 60}{4 * 15} = 6,75 \text{ min}$$

### Doba letu celkem

$t$ ...doba letu [min]

$t_h$ ...doba letu na maximální trvalý proud [min]

$t_v$ ...doba letu na maximální trvalý proud [min]

$$t = t_h + t_v = 9,41 + 6,75 = 16,6 \text{ min}$$

Celková doba letu při maximální trvalém proudu motorů je přibližně 16 min. Vypočtené hodnoty doby letu je nutné pokládat za orientační, neboť doba letu je ovlivněna dalšími faktory jako jsou povětrnostní podmínky, které nejsou ve výpočtech zohledněny.

Průměrná kombinovaná doba letu bude samozřejmě vyšší, vždy záleží na kombinaci využití motorů při letu. Dle průběžných výpočtů se lze dostat na 30-45 minut letu, vše záleží na konkrétních podmínkách. Přesnou dobu lze zjistit až při samotném testovacím letu.

## 5.4 Kontrolní výpočty

Po výběru konkrétních komponentů lze stanovit přesnou hmotnost konstruovaného modelu. Seznam komponentů je rozepsán v Tabulce níže.

Seznam komponentů			
Název	Počet kusů	Hmotnost jednoho kusu [g]	Hmotnost dohromady [g]
Skywalker X8	1	880	880
Servo	2	17	34
Přijímač	1	16	16
Karbonové tyče	2	90	180
Motor horizontální	1	132	132
Vrtule horizontální	1	30	30
ESC horizontální	1	60	60
Akumulátory	2	605	1210
Motory vertikální	4	97	388
Vrtule vertikální	4	16	64
ESC vertikální	4	26	104
Řídící jednotka	1	40	40
GPS	1	49	49
Nohy	4	40	160
Držák motoru	4	20	80
Držák ramene	4	10	40
Ostatní tisknuté části	8		30
<b>Hmotnost celkem</b>		3497 g	

Tabulka 11, Seznam využitých komponentů pro stavbu

Po sečtení všech částí vychází hmotnost 3497 g. Odhadovaná hmotnost odpovídá návrhu, ale předpokládá se mírné navýšení. Do hmotnosti není započítána kabeláž, proto se musí počítat s mírným navýšením hmotnosti. Pro další kontrolní výpočty bude hmotnost navýšena na 3600 g.

Pro kontrolní výpočty, návrh pohonné jednotky a baterií byl použit placený webový software eCalc dostupný na ecalc.ch [62]. Program eCalc umožňuje kalkulaci pro velké množství modelů a obsahuje knihovnu dostupných akumulátorů a elektromotorů světových výrobců. Je nutné podotknout, že program nevyhodnotí výsledky zcela přesně, ale stačí na ověření správných kombinací komponentů a nastínění přibližných výsledků. Výhodou je rychlé ověření parametrů bez nutnosti zdlouhavého přepočítávání, jelikož určité výpočty jsou velmi komplikované.

Pro kalkulaci se do výpočetního programu xcopterCalc základní parametry, které byly stanoveny takto:

Hmotnost modelu (s pohonem)	3600 g
Počet rotorů	4
Velikost rámu	1000 mm
Kapacita baterie	2x 6750 mAh (13500 mAh)
Konfigurace baterie	4S2P
Stupeň maximálního vybití	80 %
Proudový výkon	25 C trvalý / 35 C maximální
Typ regulátoru a proud	40 A
Výrobce a typ motoru	T-motor MN3510 KV700
Typ vrtule	T-motor CF
Průměr a stoupání	13*4,4
Počet listů	2

Tabulka 12, Hodnoty zadané do programu eCalc

Po dosažení daných hodnot program vyhodnotí, zda je kombinace parametrů správná či nikoliv. Výsledky jsou zobrazeny na Obrázku 23, kde program jako nejdůležitější parametry zachycuje zatížení, dobu letu ve visu, příkon, odhad teploty, tah-hmotnost a specifický tah. Hodnoty se nachází v zeleném poli, což značí, že je konfigurace dostačující. Jediným parametrem nacházející se ve žlutém poli je příkon, ale jeho hodnota jen mírně překračuje doporučenou hodnotu, není potřeba tuto konfiguraci upravovat.



Obrázek 23, Výsledné hodnoty programu eCalc

<b>Akumulátor</b>	
Zatížení	8,79 C
Napětí	14,44 V
Jmenovité napětí	14,8 V
Energie	199,8 Wh
Celková kapacita	13500 mAh
Využitá kapacita	10800 mAh
<b>Motor optimální účinnost X maximální výkon</b>	
Proud	12,99 A X 29,67 A
Napětí	14,57 V X 14,27 V
Otáčky	9703 ot/min X 8859 ot/min
Příkon	189,2 W X 423,2 W
Mech. Výkon	171,4 W X 368,1 W
Účinnost	90,6 % X 87 %
<b>Celý pohon</b>	
Tah-hmotnost	2,1 : 1
Proud při visení	38,89 A
Proud max	118,67 A
P (in) max	1756,3 W
P (out) max	1472,4 W

Tabulka 13, Vybrané hodnoty parametrů

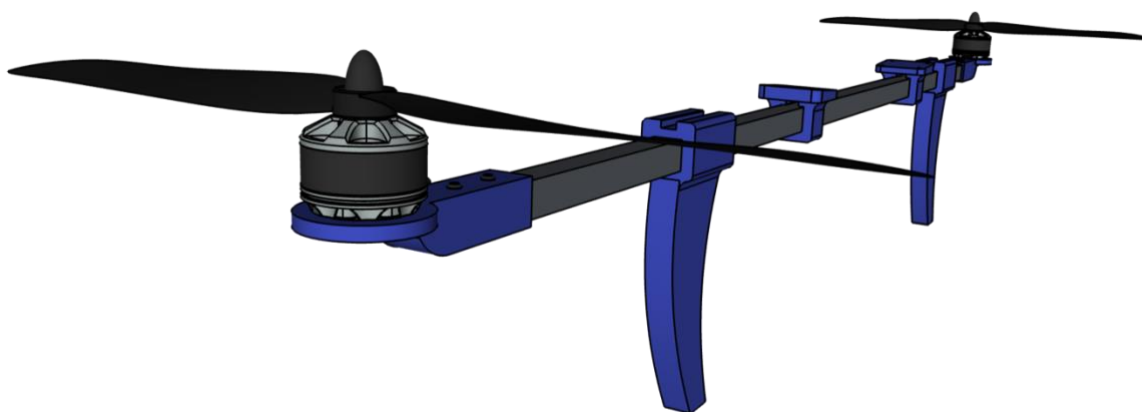
## 6 Konstrukce

Na základě předcházejícího návrhu a výběru konkrétních komponentů bylo možné začít s konstrukcí bezpilotního prostředku. Základ konstrukce tvoří fixní křídlo, ke kterému se spojovacím materiálem a vytištěnými prvky připevní ramena nesoucí vertikální motory. Následně se umístí a zapojí všechny potřebné komponenty pro chod letounu.

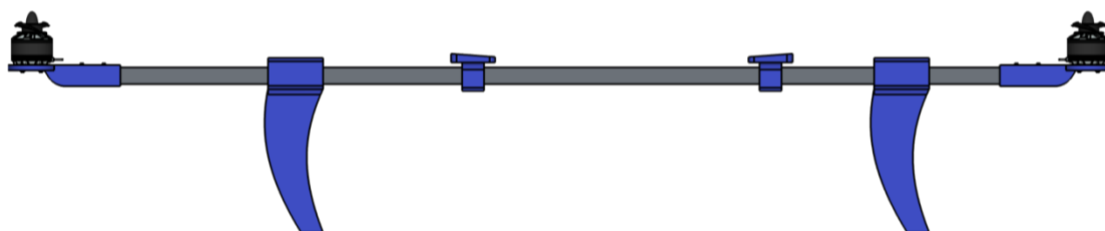
### 6.1 Výroba ramen

Nejzávažnějším problémem při výrobě ramen bylo, jakým způsobem připevnit vybrané motory a následně jak správně upevnit daná ramena k letounu. Po zvážení všech možností bylo rozhodnuto potřebné komponenty vymodelovat a následně vytisknout za pomoci 3D tiskárny.

Základem ramene je čtverhranná uhlíková trubka o rozměrech 15x15x1000 mm. Rameno dále obsahuje dva držáky motoru, držáky ramene, které se využijí ke spojení s fixním křídlem, a takzvané „nohy“, které mají úlohu přistávacího podvozku.



Obrázek 24, Model ramene



Obrázek 25, Náhled modelu z boční části

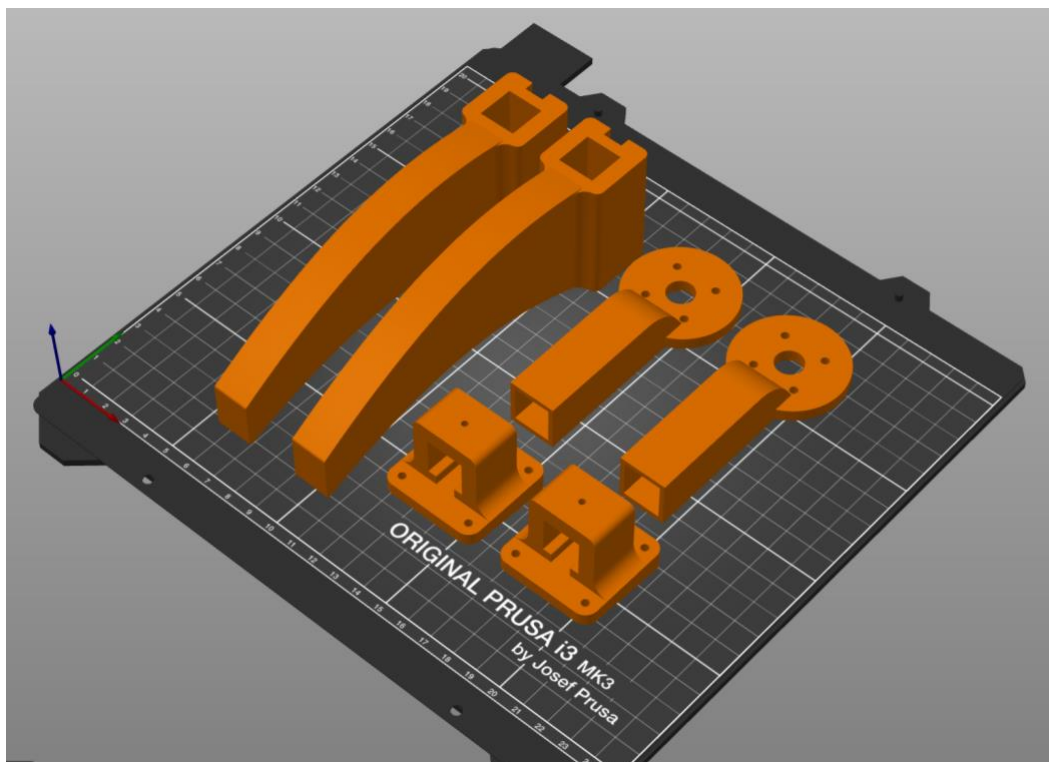


### 6.1.1 3D modeling, tisk

Přestože vizualizace letounu byla vytvořena v CAD programu Shapr3D, pro modelování tisknutelných dílů byl zvolen program Fusion 360 od firmy Autodesk. Program Sharp3D lze využít pouze na tabletu iPad s podporou Apple Pencil a přesun souborů z tabletu do 3D tiskárny je zbytečně komplikovaný. Oba zmíněné programy podporují studentské licence a lze je po dobu studia využít zdarma.

Vymodelované části byly vytlačeny na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3S od Josefa Průši. Tiskárna Original Prusa i3 MK3S podporuje nespočet materiálů, mezi základní patří PLA, ABS, PETG, ASA. Oproti předcházející verzi má vylepšený extruder, množství nových senzorů, odnímatelnou magnetickou vyhřívanou tiskovou podložku a další drobná vylepšení. Průměr trysky je 0,4 mm a průměr struny 1,75mm. Tiskový prostor má rozměry 250x210x210 mm.

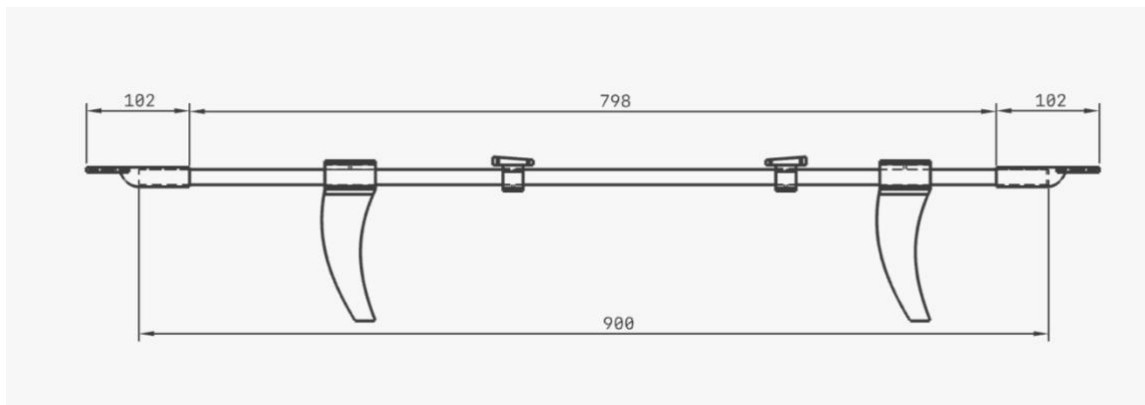
Pro tisk komponentů byl zvolen materiál PETG. PETG je velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností. PETG má univerzální využití, ale je především vhodný pro tisk mechanických částí. Díly je tak možné využít jak ve vnitřním prostředí, tak i ve venkovním. PETG má velmi malou tepelnou roztažnost. Na podložce se tedy nekrouť a lze ho využít pro tisk větších modelů. Pro vytvoření G-code souboru z STL modelů byl využit program PrusaSlicer.



Obrázek 26, STL modely v programu PrusaSlicer

## 6.1.2 Kompletace ramene

Z důvodu zachování délky výsledného ramene se uhlíková trubka zkrátila o 10 cm. Výsledná délka ramene s vytištěnými komponenty je 1002 mm.



Obrázek 27, Rozměry ramene (mm)

Vytištěné díly jsou nasazeny na uhlíkové rameno a připevněny za spojovacím materiálem. Jedná se o šrouby imbus M3 s válcovou hlavou o rozměrech 6, 8 a 10 mm. Střídací motory jsou přimontovány šrouby M3 k držáku motoru. Kabely vedoucí od motoru se pro lepší manipulovatelnost a vzhled modelu připevnily k ramenům za pomoci černé lepicí pásky.



Obrázek 28, Zhotovená ramena

## 6.2 Sestavení modelu

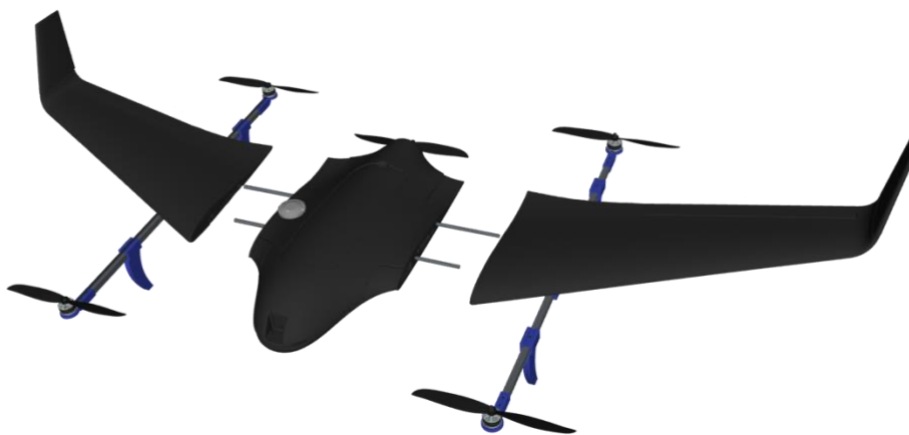
Po zkompletování ramen pro vertikální motory se přistoupilo k sestavení fixního křídla. Fixní křídlo Skywalker X8 se skládá z trupu, párů křídel a wingletů. Křídla jsou prostřednictvím dvou uhlíkových trubek spojena k trupu a koncové winglety jsou přilepeny a přišroubovány ke křídlům.

Na složené fixní křídlo se usazují ramena, které se připevňují skrz předpřipravené díry držákem ramene a spojovacím materiálem. Při provrtávání je nutné postupovat obezřetně, aby se daný povrch nenarušil.



*Obrázek 29, Složený model*

Při návrhu byla důležitá i skladnost. Hotový model lze kdykoliv jednoduše rozložit na tři části. V případě potřeby větší skladnosti lze pouhým povolením spojovacího materiálu odpojit ramena a rozložit tak letoun na pět dílů.



*Obrázek 30, Rozložení modelu na tři díly*

## 6.3 Zapojení palubní elektroinstalace

Centrem palubní elektroinstalace je řídicí jednotka, která zajišťuje správný chod celého systému. Všechny komponenty jsou zapojeny právě skrz řídicí jednotku. Přestože řídicí jednotka Pixhawk efektivně redukuje vibrace, je dobré ji umístit tak, aby byly vibrace co nejvíce eliminovány. Ke správnému umístění jsem použila laminátovou destičku, na které jsou ze spodní strany připevněny silentbloky. Silentbloky napomáhají k redukci vibrací. Připravená laminátová deska je za pomoci vytištěných podpěr připevněna k vnitřku trupu letounu. Na výsledné konstrukci je přichycena řídicí jednotka.



Obrázek 31, Laminátová konstrukce ke snížení vibrací

Připravená ramena byla osazena jednotlivými motory. Kably vyvedené z motorů se protáhly prostřednictvím připravených děr do trupu letounu. Na regulátory otáček byly připájeny konektory MR60 – F, které slouží pro snadné spojení s motory.



Obrázek 32, Připájené konektory MR60

Osazené motory mají na vyvedených kabelech připájeny konektory typu „banánek“ již z výroby. Tyto konektory byly odstraněny a následně nahrazeny konektory typu MR60-M sloužící ke spojení s připravenými regulátory. Vybrané konektory MR60 jsou zkonstruovány tak, že je lze připojit pouze jedním směrem. Předchází tak situaci, kdy by při připojování motorů mohlo dojít k přehození kabelů a následné změně rotace daného motoru.

Bylo tak nutné vyzkoušet rotaci motorů ještě před připájením konektorů. Každý jednotlivý motor se za pomoci baterie a regulátoru zprovoznil a tím se tak zjistil směr rotace. Při běžných sudých konfiguracích uložení motorů platí, že sousední motor se vždy musí točit opačným směrem.

Konkrétní rozmístění motorů a jejich rotace je následovné:

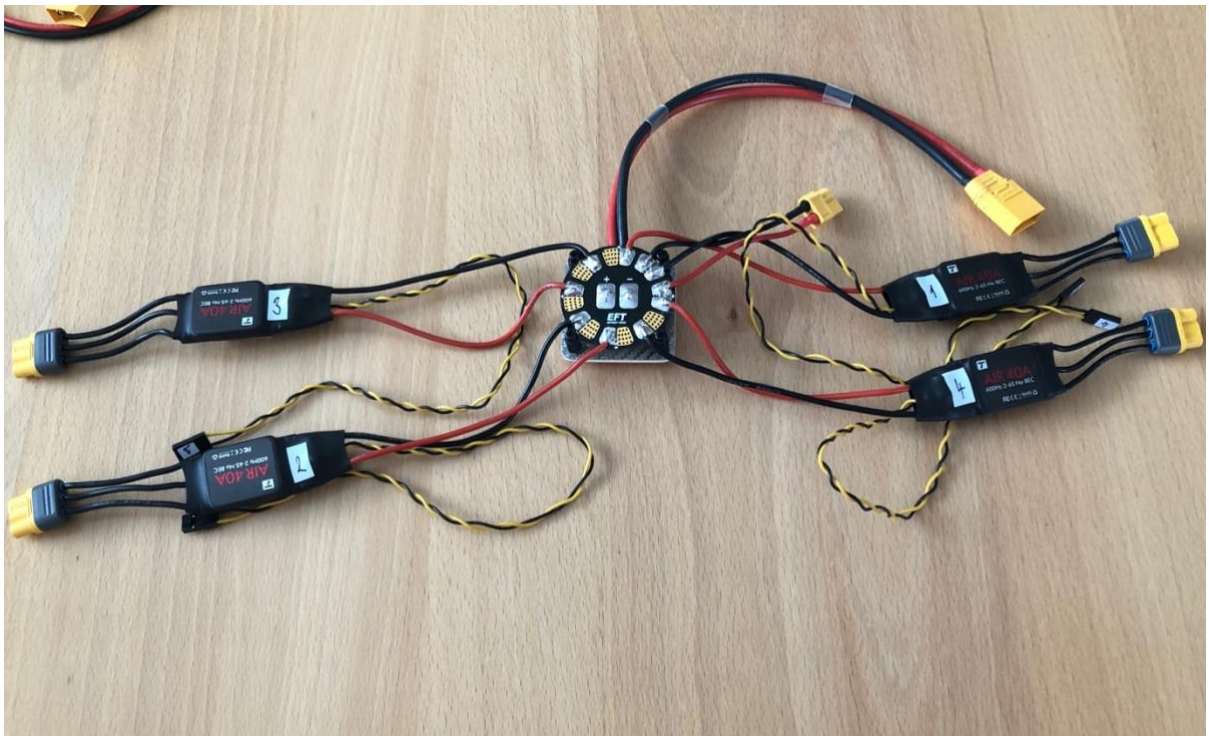
- Motor 1 (vpravo nahoře) – proti směru hodinových ručiček
- Motor 2 (vlevo dole) – proti směru hodinových ručiček
- Motor 3 (vlevo nahoře) – po směru hodinových ručiček
- Motor 4 (vpravo dole) – po směru hodinových ručiček



Obrázek 33, Umístění a rotace motorů

Před zapojením je vždy vhodné si motory a související díly označit příslušnými čísly. Čísla usnadní výslednou kompletaci letounu a předejde se tak i možným chybám. Po sestavení motorů přichází na řadu systém pro rozvod patřičného napájení celého letounu.

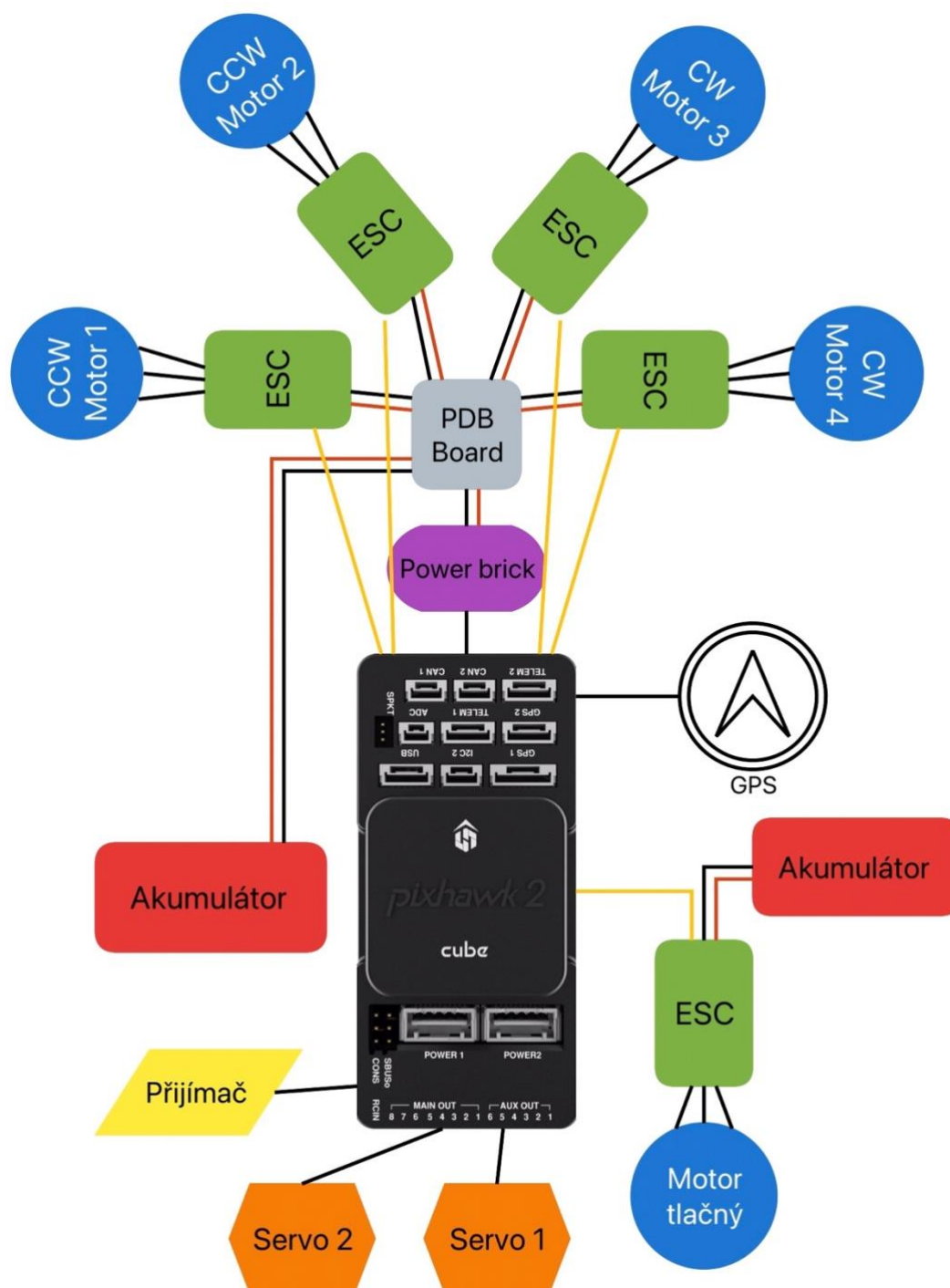
Jako nejvhodnější řešení pro rozvod napájení se naskytlo použití PDB (Power Distribution Board) neboli distribuční desky. Distribuční deska slouží nejčastěji pro rozvod napětí mezi ESC regulátory. Power boardy se vyrábějí pro různé hodnoty proudového zatížení, vybraná deska je schopna unést 200 A, což je naprosto dostačující pro daný systém. Na PDB se vodiče připájejí a spoj je odolný bez rizika jeho nechtěného uvolnění. Na PDB byly připájeny vodiče pro vstupní napájení z akumulátoru s konektorem XT90, regulátory pro vertikální motory a větev vodičů s konektorem XT60, která slouží pro připojení Power brick určené pro napájení řídicí jednotky. Napájecí PDB je jednou z nejpodstatnějších součástí a pájení je potřeba věnovat velkou pozornost, aby bylo eliminováno riziko možných „studených spojů“, které by vedly k bezprostřední havárii letounu.



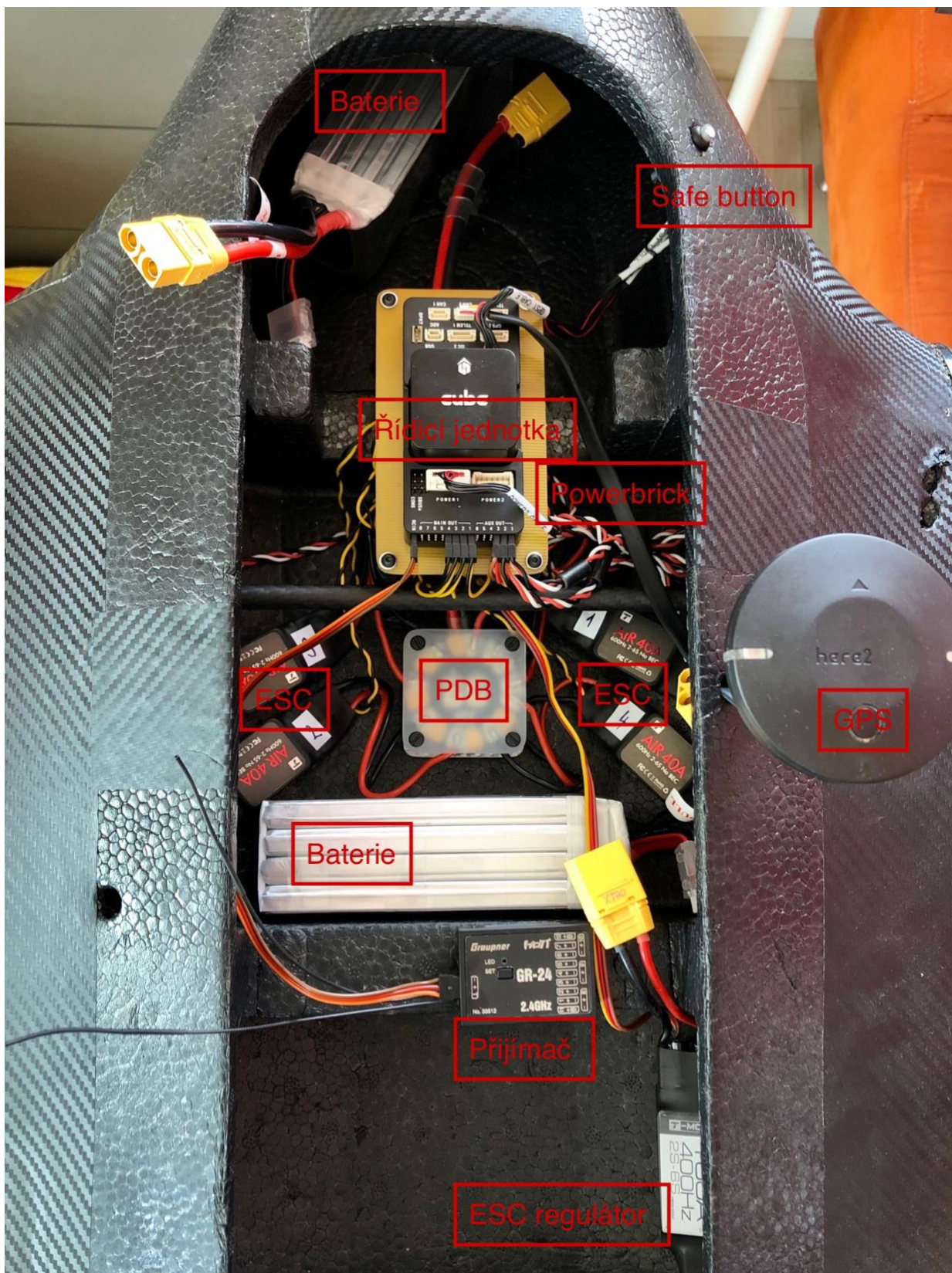
Obrázek 34, Zapojení Power Distribution Board

Pro napájení letounu slouží dva zvolené akumulátory 6750 mAh s napětím 14,8 V. První je připojen ke zmiňované PDB a slouží pro napájení vertikálních motorů a řídicí jednotky. Druhý akumulátor je připojen k regulátoru pro tlačný motor. Než jsem však zapojila napájení, bylo nutné prověřit, jestli napájení z baterie nepřesahuje maximální povolené napětí, které jednotka snese. Pokud by bylo napájení z baterie vyšší než jednotka podporuje, bylo by nutné použít srážecí napětí nebo použít samostatnou baterii pro napájení řídicí jednotky. Daný problém byl vyřešen zmíněným vytažením větve z PDB a napojení skrz Power brick hlídající požadované napětí pro řídicí jednotku.

Následovalo připojení jednotlivých prvků k řídicí jednotce. Regulátory vertikálních motorů byly připojeny k portům MAIN 1–4, servomotory k portům AUX 1–2 a regulátor tlačného motoru k portu AUX 3. Poté následovala GPS jednotka připojená do CAN2, přijímač do RC IN. Napájení řídicí jednotky je realizováno skrz Power brick, který je připojen do POWER 1. Kompletní zapojení elektroinstalace je znázorněno na Obrázku 35.



Obrázek 35, Palubní elektroinstalace



Obrázek 36, Rozmístění jednotlivých komponent uvnitř trupu



## 7 Základní nastavení a testování

Po zkompletování celého systému je nutné spárovat RC systém a nastavit kanálům potřebné funkce. Poté nahrát firmware do řídicí jednotky a následně ji zkonfigurovat. Konfigurace řídicí jednotky je jedna z nejpodstatnějších částí při stavbě a testování bezpilotního letounu. Bez správné konfigurace by letoun nemusel být schopen ani vzlétnout. V rámci konfigurace je nejdůležitější kalibrace senzorů. V první řadě je nezbytné zkalibrovat gyroskop a akcelerometry, poté se přistoupí ke kalibraci kompasu. Samozřejmě nesmíme zapomenout na kalibraci RC vysílače. Po kalibraci senzorů můžeme přistoupit k testování motorů. Motory musí být správně usazeny a každý se musí točit na správnou stranu. Pokud dojde k tomu, že dva motory, které se nachází vedle sebe, se točí na stejnou stranu, letoun nepoletí. Totéž platí i pro případ, že každý z motorů bude mít jiné otáčky. Je nutné otestovat, zda při změně polohy páky na ovladači letoun adekvátně uzpůsobí otáčky motorů.

### 7.1 Nastavení RC systému

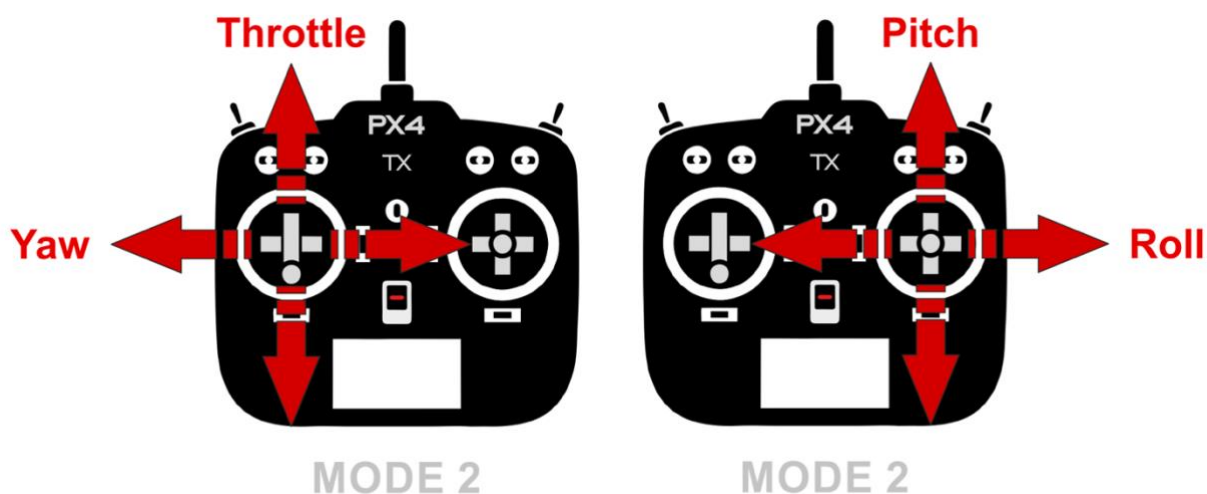
Vstupem pro manuální řízení je dvanácti kanálový vysílač Graupner MC–20. Ten posílá řídicí signály na frekvenci 2,4 GHz do spárovaného dvanácti kanálového přijímače Graupner Hott GR–24. Vysílač přes potenciometry snímá polohu řídicích pák pilota a vysílá je v podobě elektrického signálu do přijímače. 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.

Jelikož lze ve vysílači přiřadit každému kanálu libovolnou funkci, může být rozvržení kanálů libovolné. Pro zjednodušení lze přiřadit základní ovládání prvním čtyřem kanálům, pro které se běžně používá název kanálů podle řídicích ploch klasického letounu.

Přiřazení kanálů:

- kanál 1 – Throttle
- kanál 2 – Roll
- kanál 3 – Pitch
- kanál 4 – Yaw
- kanál 5 – Způsob letu
- kanál 6 – Letové módy

Každý vysílač musí být před použitím nastaven na určitý mód ovládání. Příklad ovládání RC vysílače v módu 2 je zobrazen na Obrázku 37.



Obrázek 37, Ovládání RC vysílače v módu 2 [63]

## 7.2 Nastavení řídicí jednotky

Konfigurace byla prováděna v softwaru QGroundControl, který je kompatibilní s řídicí jednotkou Pixhawk. Jedná se o poměrně intuitivní program a jeho grafické rozhraní je velmi příjemné. Software poskytuje snadné a přímé použití pro začátečníky a zároveň poskytuje špičkovou podporu funkcí pro zkušené uživatele. Pokud to řídicí jednotka umožňuje, lze zde nastavit opravdu mnoho parametrů. Jako například maximální vzdálenost, které může letoun dosáhnout, maximální výšku či další parametry zobrazené v kapitolách níže.

### 7.2.1 Instalace QGroundControl

QGroundControl lze nainstalovat na všechny počítačové operační systémy. QGC lze nainstalovat na mobilní platformy iOS a Android, avšak zde nepodporuje konfiguraci strojů, slouží především jako zobrazovací zařízení. Konkrétní hardwarové požadavky nejsou na oficiálních stránkách uvedeny.

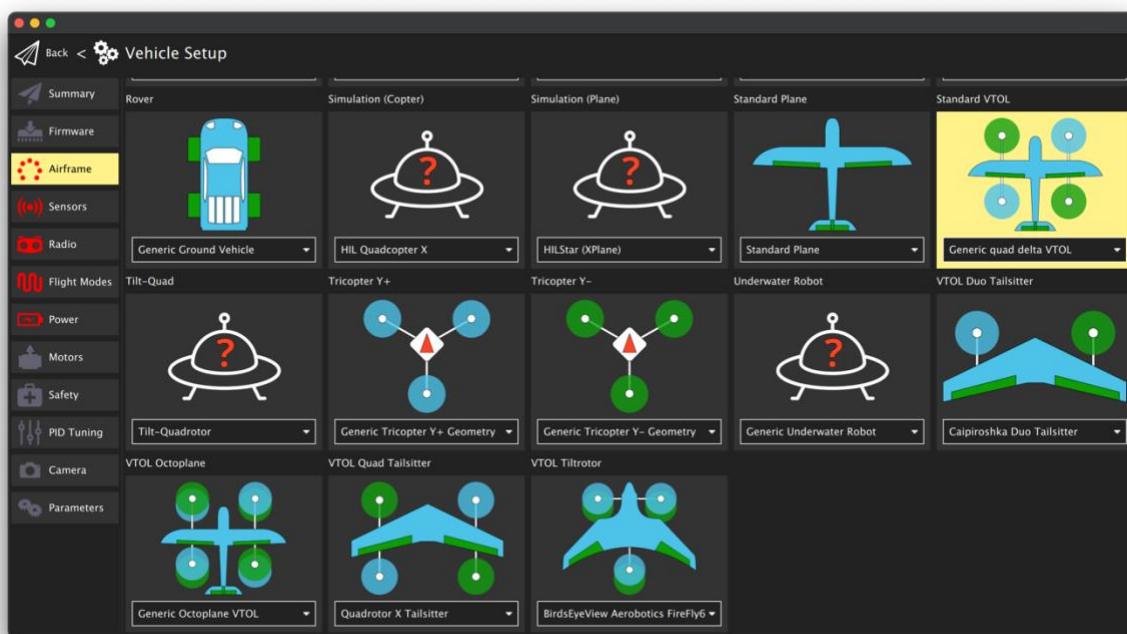
Software je dostupný na: <http://qgroundcontrol.com>.

## 7.2.2 Instalace firmware PX4 a specifikace letounu

Pro instalaci je nezbytné, aby řídicí jednotka podporovala zvolený firmware PX4. V konstrukci je aplikován autopilot Pixhawk, který daný firmware podporuje. Pro nahrání postačí připojit řídicí jednotku k počítači za pomoci USB kabelu. V QGC lze intuitivně vybrat požadovaný firmware, který se následně nahraje na řídicí jednotku. Při specifických požadavcích lze vybrat v pokročilém nastavení konkrétní verzi firmwaru (Beta, Master) či nahrát vlastní upravený firmware. Před zahájením instalace firmwaru musí být odpojena všechna USB připojení k letounu a nesmí být napájen baterií.

Po instalaci firmwaru se nakonfigurují parametry firmwaru pro konkrétní drak letadla. PX4 obsahuje širokou škálu typů letadel, multikoptér, aut či jiných specifických strojů. Z tohoto důvodu nebylo nutné vytvářet vlastní konfiguraci, jelikož firmware obsahuje mnoho typů VTOL letounů. Konkrétně byla vybrána konfigurace Generic quad delta VTOL. Vybraná konfigurace má tyto výstupy:

- MAIN 1: MOTOR 1
- MAIN 2: MOTOR 2
- MAIN 3: MOTOR 3
- MAIN 4: MOTOR 4
- AUX 1: RIGHT ELEVON
- AUX 2: LEFT ELEVON
- AUX 3: MOTOR

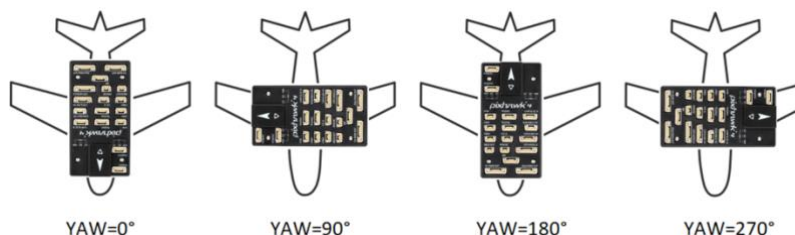


Obrázek 38, Nastavení typu letounu

### 7.2.3 Kalibrace systému

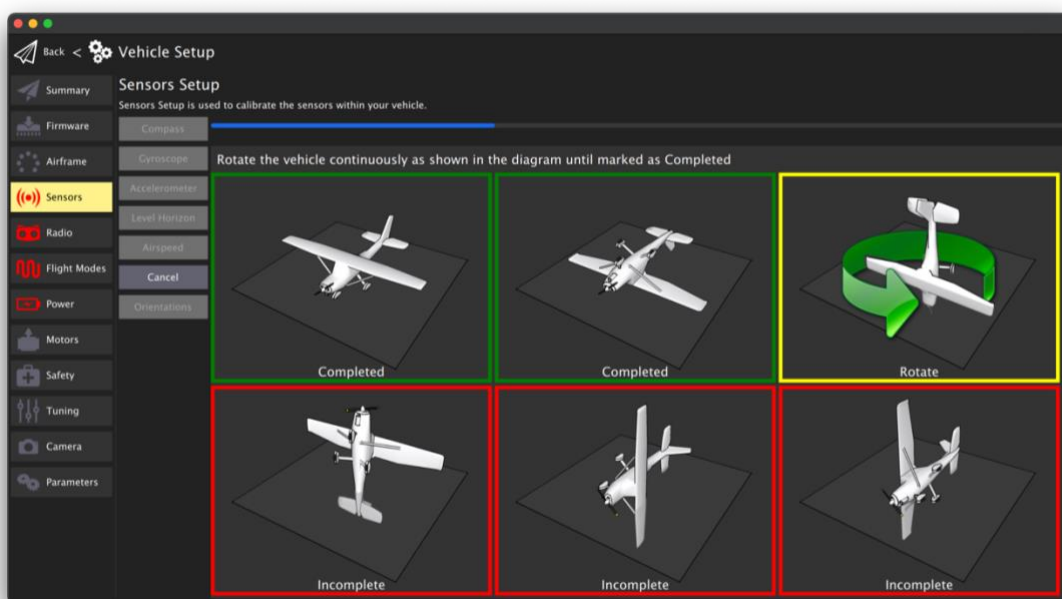
Po nastavení konfigurace letounu je dalším krokem kalibrace senzorů. Ke správnému fungování systému je nutné uskutečnit několik kalibračních procesů, aby řídicí jednotka byla schopna sbírat potřebné údaje pro přesné vyhodnocení její polohy.

Ve výchozím nastavení by měla být řídicí jednotka umístěna a orientována tak, aby šipka směřovala k přední části letounu. Pokud je jednotka umístěna v jiné orientaci, musí se změna orientace nakonfigurovat ve firmwaru.



Obrázek 39, Orientace řídicí jednotky

Po nastavení orientace lze začít s kalibrací senzorů v řídicí jednotce. Jedná se o akcelerometr, gyroskop a kompas. Proces kalibrace kompasu konfiguruje všechny připojené interní a externí magnetometry. Kalibrace se provádí polohováním řídicí jednotky v několika nastavených orientacích a otáčením kolem zadané osy. Akcelerometr se kalibruje při prvním použití nebo při změně orientace řídicí jednotky. Provádí se polohováním řídicí jednotky v několika nastavených orientacích bez otáčení kolem osy. Při kalibraci gyroskopu stačí jednotku umístit na rovný povrch a udržovat ji v klidu. Program dále umožňuje kalibraci vodorovného obzoru a rychlosti vzduchu, letoun však musí být vybaven externím senzorem měření rychlosti vzduchu.

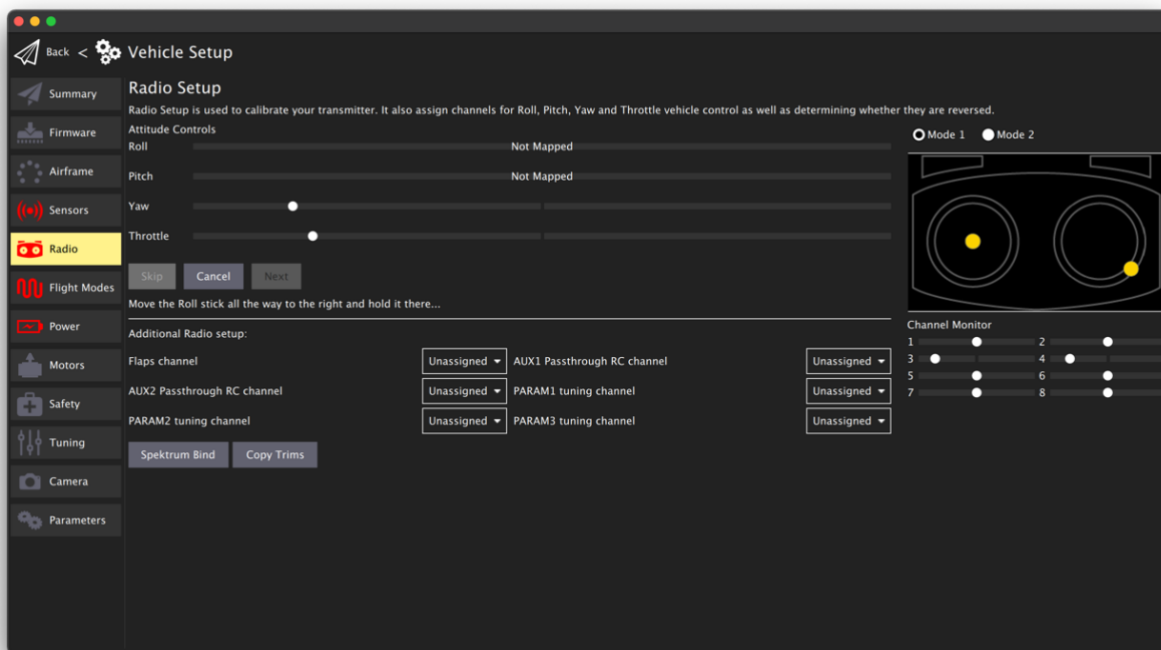


Obrázek 40, Proces kalibrace kompasu

## 7.2.4 Nastavení rádia

Radio Setup se používá ke konfiguraci mapování hlavních ovládacích prvků dálkového ovladače na kanály a ke kalibraci nastavení minima, maxima či trimu pro všechny ostatní ovládací prvky vysílače. Před kalibrací rádiového systému musí být vysílač propojen s přijímačem. Správné nastavení vysílače je důležité pro přesné ovládání letounu. Vysílačem se ovládá pohyb a orientace v prostoru. Výchylkou parametru ROLL se realizuje náklon doleva a doprava, tedy rotace na ose x. Parametr PITCH značí náklon dopředu a dozadu, tedy osa y. YAW je rotace kolem svislé osy z. Stoupání a klesání, tedy rotace motorů je ovlivněna parametrem THROTTLE. Další parametry slouží ke změnám leteckých módů nebo například k ovládání stabilizačních zařízení. Každý z těchto parametrů je přiřazen jednomu z kanálů na vysílači. Pixhawk musí znát maximální rozsahy všech kanálů.

Nastavení se provádí v okně Radio Setup pohybem kniplů, potenciometrů a přepínačů do maximálních poloh. Nastavení dále umožňuje přiřadit kanály vysílače až ke třech vybraných parametřů nastavení řídicí jednotky. Lze tak přímo z RC vysílače upravovat hodnoty vybraných parametrů, například hodnoty PID. Další kanály je možné přiřadit k funkcím, které ovládají hardware připojený skrze AUX. Využívají se například při potřebě ovládání polohy kamery či fotoaparátu skrze servomotory přímo z RC vysílače.



Obrázek 41, Průběh nastavování RC vysílače

## 7.2.5 Nastavení letových módů

Letové režimy poskytují různé typy letu s autopilotem nebo autonomní let prostřednictvím misí nebo řízením skrze pozemní stanici. Umožňují také automatizaci běžných úkolů, jako je vzlet, přistání a návrat do původní startovací polohy. Základní letové režimy byly popsány v kapitole 5.2.5.

PX4 umožňuje zvolit letové režimy z pozemní stanice (z tabletu nebo stolní počítače) nebo z rádiového vysílače. Pokud je připojeno rádiové ovládání a tablet, může každý systém zvlášť změnit režim a přepisovat předchozí nastavení. Dané nastavení umožňuje mapovat kanály vysílače k vybraným letovým módům. Lze tak prostřednictvím vysílače měnit letové módy letounu.

## 7.2.6 Failsafe

PX4 obsahuje řadu bezpečnostních prvků pro ochranu a zotavení letounu, pokud dojde k nějaké chybě. Failsafe umožňuje specifikovat oblasti a podmínky, za kterých může letoun bezpečně létat a akci, která bude provedena (například přistání, pozice držení nebo návrat do určeného bodu), pokud dojde k aktivaci Failsafe. Nejdůležitější nastavení zabezpečení proti selhání se konfiguruje v bezpečnostním nastavení QGroundControl. Ostatní je třeba konfigurovat pomocí parametrů. Každé zabezpečení proti selhání si definuje vlastní sadu akcí.

Mezi základní akce patří:

- NONE/DISABLED – žádná akce, Failsafe je ignorován
- WARNING – na pozemní stanici či vysílač je odeslána varovná zpráva
- HOLD MODE – přejde do režimu HOLD (držet) – multikoptéra se vznáší na místě, letoun krouží dokola
- RETURN MODE – přejde do režimu RETURN (návrat) – návrat na původní pozici
- LAND MODE – přejde do režimu LAND (přistání) – okamžitě přistane
- LOCKDOWN – zablokují se motory

V bezpečnostním nastavení se nastavují zejména tyto parametry:

### Slabá baterie

Failsafe baterie se aktivuje, když kapacita baterie klesne pod jednu (nebo více varovných) hodnot úrovně. Nastavení umožňuje až 3 různé hodnoty.

## Ztráta RC spojení

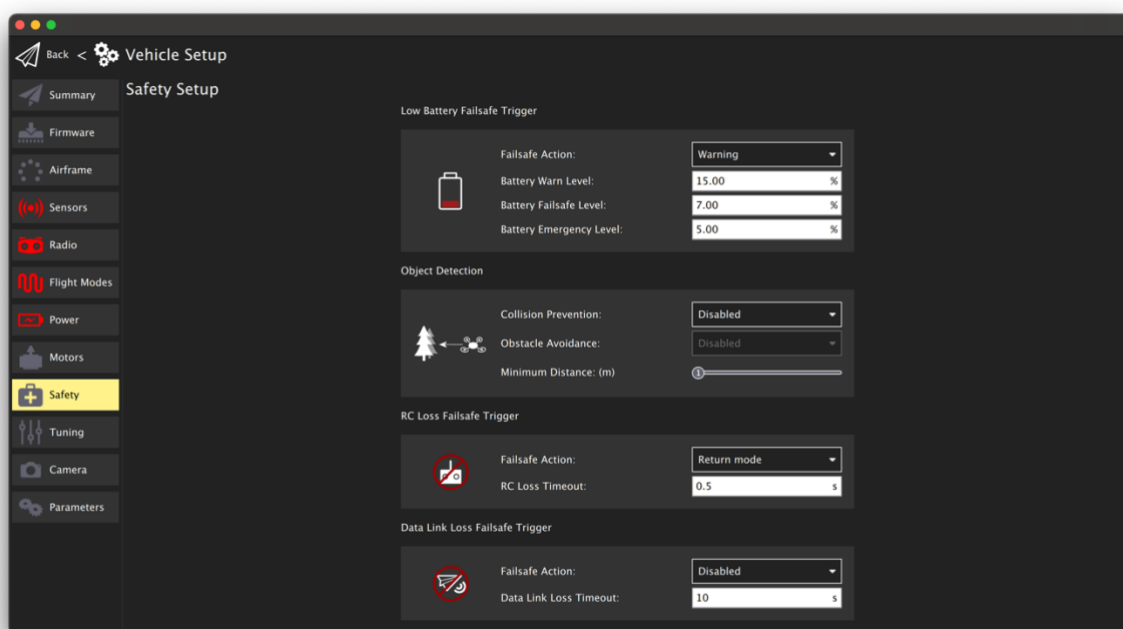
Failsafe se aktivuje, pokud dojde ke ztrátě spojení RC vysílače v manuálních režimech (RC Loss nespustí Failsafe v automatických režimech, např. během misí).

## Ztráta datového spojení

Failsafe se aktivuje, pokud dojde ke ztrátě telemetrického spojení (připojené k pozemní stanici) při letových misích.

## Nastavení režimu návratu

Návrat je běžná Failsafe akce, která aktivuje režim návrat letounu do výchozí polohy.



Obrázek 42, Bezpečnostní nastavení

V nastavení lze upravit mnoho dalších parametrů do zvýšení bezpečnosti letu. Vždy záleží na konkrétních podmínkách a požadavcích letu. Mezi další parametry patří například chování při LAND módu, ztráta GPS pozice, kontrola mise a další.

System dále umožňuje přesné zadání hodnot baterie jakožto nastavení rozsahu mezi podbitým a plně nabitým článkem baterie nebo počet článků dané baterie. Software také umožňuje pokročilé úpravy jednotlivých parametrů celého systému dle potřeby ovládní letounu. Mezi pokročilé nastavení patří zejména ladění citlivosti letových charakteristik letounu a jednotlivých parametrů. Podrobný popis nastavení řídicí jednotky je uveden v příloze č.1.

## 7.3 Testování funkčnosti

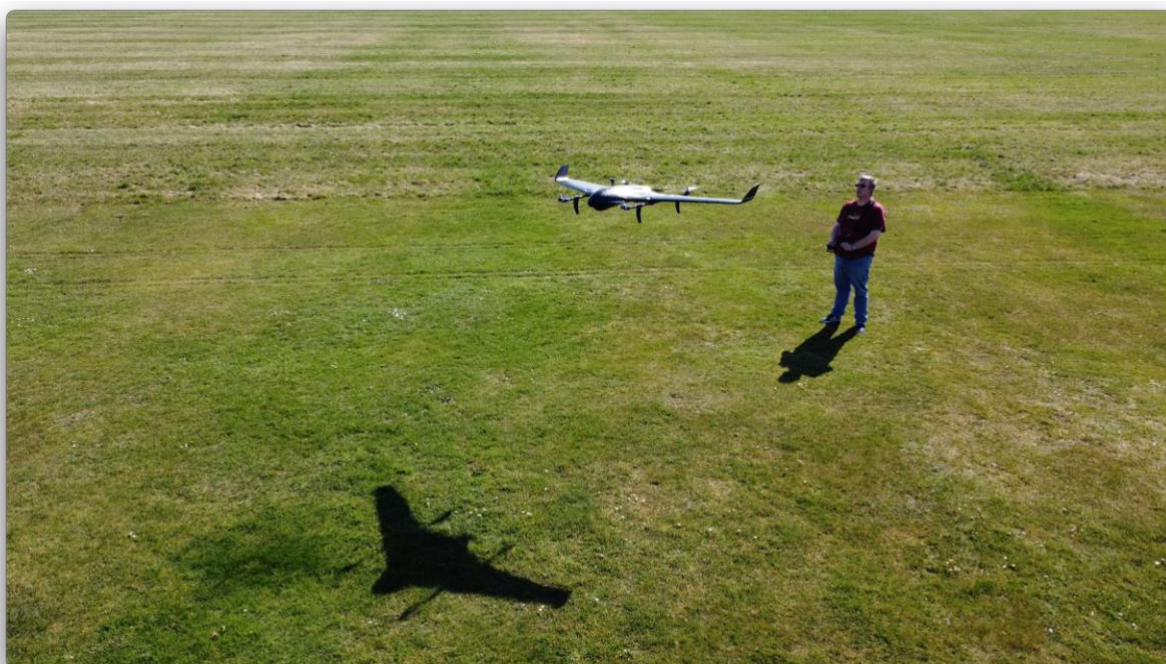
Po nastavení základních parametrů v příslušném softwaru je nutné ještě zkalibrovat regulátory motorů. Nejdříve se zapne vysílač a knipl pro regulaci otáček motorů se nastaví do maximální polohy. Následným připojením napájení je dáno řídicí desce najevo, že chceme provést kalibraci regulátorů. Odpojením a opětovným připojením baterie spustíme kalibraci, která je signalizována dlouhým tónem. Následně zbývá knipl regulace otáček posunout do minimální polohy, kde krátký tón potvrdí kalibraci. Tím je kalibrace dokončena a všem regulátorům definována stejná velikost řídicího signálu určující velikost proudu tekoucího do motorů. Kalibraci regulátorů lze také provést přímo v softwaru QGroundControl.

Špatně kalibrovaný nebo vadný regulátor dokáže nadělat velké škody. Proto je nutné nejprve otestovat, zda všechny motory mají stejné otáčky. Tato kontrola se provádí tak, že se pouze zvýší hodnota plynu a zbylé hodnoty, například náklon či natočení zůstávají v neutrální poloze. Pokud by se stalo, že jeden z motorů vynechává nebo má špatné otáčky, může dojít k tomu, že letoun bude velmi nestabilní a v nejhorším případě se zřítí k zemi. Dále je nutné překontrolovat, zda jsou motory správně a pevně usazeny a každý se točí na správnou stranu. Pokud dojde k tomu, že dva motory, které se nachází vedle sebe, se točí na stejnou stranu, letoun nepoletí. Totéž platí i pro případ, že každý z motorů bude mít jiné otáčky. Je nutné otestovat, zda při změně polohy páky na ovladači letoun adekvátně uzpůsobí otáčky motorů. Například pokud chceme, aby ve výsledku letoun letěl doleva, otáčky levých motorů musí klesnout a zvýší se otáčky pravých motorů. Z vlastní zkušenosti lze říct, že pokud tento test neproběhne bez chyby, je potom velký problém přijít na to, co je vlastně špatně. V dané případě při konfiguraci řídicí jednotky tato situace bohužel nastala a trvalo poměrně dlouho, než se zjistila příčina problému. Konečná kontrola se týkala především kompletního zapojení, opětovného vyvážení letounu, komunikaci RC vysílače a přesného fungování navolených přepínačů pro změny způsobu letu či letových módů. Bez správného naprogramování řídicí jednotky nelze letoun zapnout. Pro odjištění motorů musí být splněny všechny podmínky, které si řídicí jednotka nárokuje.



## 7.4 Testovací let

Funkčnost letounu byla následně vyzkoušena testovacím letem. Testovací lety se prováděly v módu Stabilized, kdy režim nevyužívá GPS, letoun je plně ovladatelný pomocí vysílače, ale řídicí jednotka udržuje stabilizaci letounu. Vnější působení mají vliv na pohyb letounu. První start byl proveden do výšky do 2 metrů pro zjištění správného chování vertikálních motorů a následné přistání. Druhý start představoval vzlet do vyšší výšky cca 5 metrů, let přímo, otočení a následné přistání.



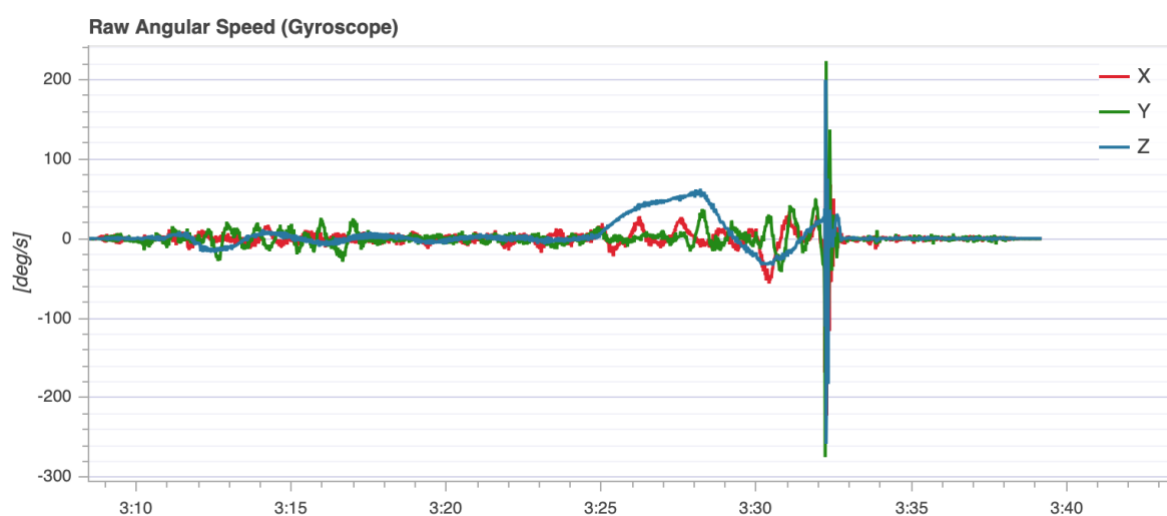
*Obrázek 43, Fotografie z testovacího letu*

Letoun se při letu choval stabilně, z hlediska nastavení řídicí jednotky nebyly shledány výrazné nedostatky. Při přistání bohužel došlo k mechanickému poškození letounu. Z důvodu nezkušenosti pilota s daným strojem a vyšší rychlosti způsobené větrem při dosedání došlo k tvrdšímu nárazu na zem a odlomení plastových částí držící ramena s motory. Poškození prvků souvisí především se zvoleným materiálem a hustotou výplně materiálu při 3D tisku. Jelikož byly při pádu poškozeny pouze plastové komponenty a jedna vrtule, nejedná se o neopravitelnou záležitost. Pro další testování je však nutné kompletně předělat mechanismus připevnění ramen ke křídlu či zvolit jiný materiál, aby byl letoun schopný bezpečného přistání a nehrozilo poškození modelu. Po opravě lze provádět další letové zkoušky a dále tak optimalizovat chod letounu.



Obrázek 44, Poškozená ramena

Z důvodu poničení modelu nebylo v dané době možné pokračovat leteckých testech a získávat tak další relevantní informace, které by pomohly pro následnou optimalizaci letounu. Přestože se jednalo pouze o krátký let před poškozením daného stroje, z dostupných dat získaných z logu provedeného letu lze říct, že z hlediska stability byla řídicí jednotka naprogramována správně a není prozatím nutné nastavení měnit. Graf ze získaných dat gyroskopu na Obrázku 45 zobrazuje stabilní chování letounu za letu. Výrazná výchylka na grafu znázorňuje náraz větru a prudké přistání na zem.



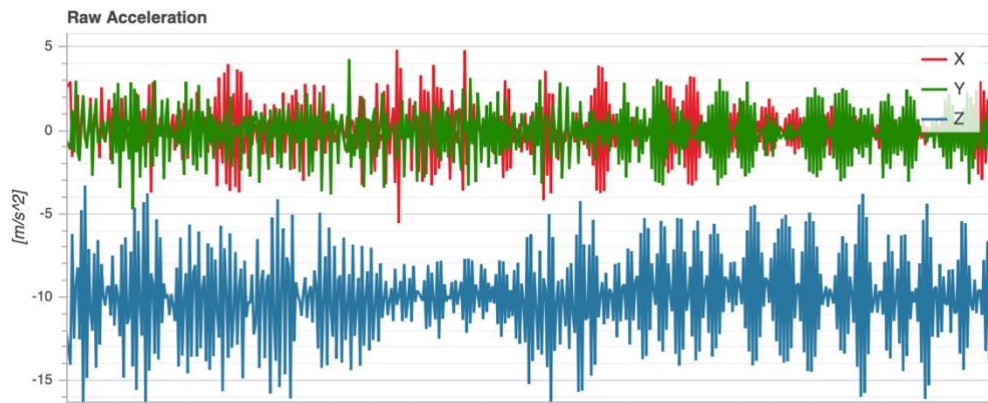
Obrázek 45, Graf získaných údajů gyroskopu

Nízkou úroveň vibrací zobrazuje graf ze získaných hodnot akcelerometru na Obrázku 46.



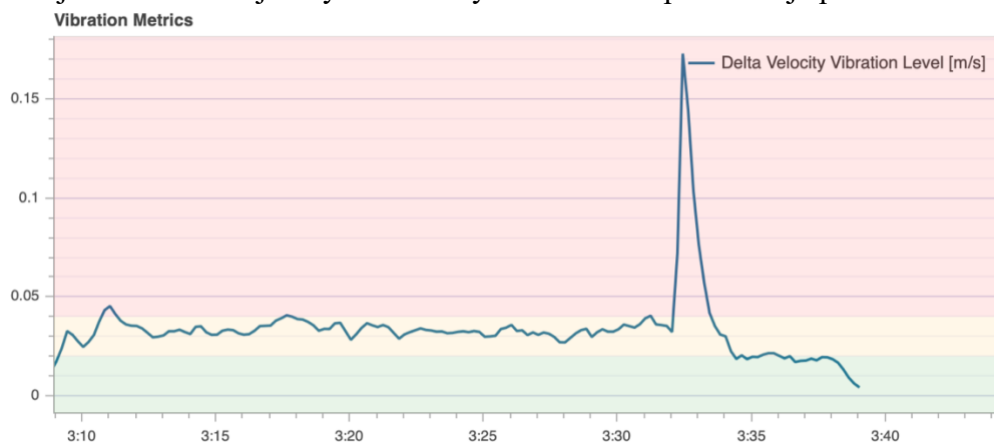
Obrázek 46, Graf hodnot akcelerometru

Přibližné hodnoty akcelerometru na Obrázku 47 značí korektní hodnoty vibrací při zrychlení. V ideálním případě je každá čára tenká a jasně ukazuje zrychlení vozidla. Pokud by se hodnoty X a Y mísily s hodnotou Z, značilo by to příliš vysoké hodnoty vibrací a špatné nastavení systému.



Obrázek 47, přibližné hodnoty akcelerometru

Úroveň vibrací v řídicí jednotce dosahuje průměrných hodnot, z hlediska konkrétního modelu se jedná o dostačující výsledek. Zvýšená hodnota představuje přistání modelu.



Obrázek 48, hodnoty měřených vibrací v řídicí jednotce

## 8 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce byla konstrukce bezpilotního letounu. Stavba bezpilotního letounu není lehký úkol, zvláště pro někoho, kdo se s tím nikdy nesetkal.

Koncepce UAV jako VTOL letounu má dobré předpoklady do budoucna. Kombinuje výhody multikoptéry, což je především dobrá manévrovatelnost, vertikální vzlet, možnost visení na místě a delší dobu provozu, které dosahuje fixní křídlo. Výhodou je také vyšší bezpečnost při selhání motorů, letoun by měl být schopen díky dostatečné ploše křídel klouzavého letu a tím tak zmírnit následky pádu.

Teoretická část slouží především jako ucelený úvod do oblasti bezpilotních letounů. Byla provedena rešerše běžně používaných typů bezpilotních letounů a jejich následné využití. První část také pokrývá problematiku nové evropské legislativy, která mění a sjednocuje pravidla létání s danými stroji. Rovněž byly podrobně vysvětleny všechny potřebné komponenty, které jsou součástí bezpilotních prostředků.

Praktická část pak popisuje návrh modelu za pomoci CAD softwarů. Následuje popis vybraných komponentů pro stavbu konkrétního letounu. Poté práce pojednává o postupu sestavení daného modelu bezpilotního letounu. V poslední části se zabývá základním nastavením řídicí jednotky a testování funkčnosti.

Jak bylo zmíněno na začátku, vlastní stavba dronu (v našem případě VTOL letounu) není lehký úkol. Je to komplexní činnost, která vyžaduje znalosti z několika oblastí a žádná se nesmí podcenit. Při stavbě vyplouvaly na povrch různé problémy, které bylo nutné řešit průběžně. Při prvních zkušebních letech došlo k mechanickému poškození letounu z důvodu nezkušenosti pilota s danými stroji. Přestože se jedná o model řízený řídicí jednotkou, v letových módech s manuálním ovládním jsou důležité zkušenosti s pilotováním modelů podobné konstrukce. Další zkušební testy je možné provést po optimalizaci a následné přestavbě upevnění ramen, aby byl letoun schopen snést i tvrdší přistání.

Vývoj bezpilotního letounu nelze asi nikdy pokládat za definitivní, při konstrukci dalšího modelu by se mohlo u spousty věcí postupovat jinak a zkušeněji, a tím celou sestavu neustále vylepšovat. Totéž platí u programového ladění, korektní let záleží na každém správně nastaveném parametru, jinak může dojít až ke katastrofickým scénářům. Stavba patřičného stroje tak chce především čas a trpělivost.

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KARAS, Jakub a Tomáš TICHÝ. Drony. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4680-4.
- [2] ZALOGA, Steven J. *Unmanned Aerial Vehicles: Robotic Air Warfare 1917–2007*. Osprey Publishing, 2008. ISBN 978-1-84603-243-1.
- [3] *Oxford Public International Law: Unmanned Aerial Vehicles* [online]. [cit. 2021-01-13].  
Dostupné z: <https://opil.ouplaw.com/view/10.1093/law:epil/9780199231690/law-9780199231690-e2133>
- [4] *Doplněk X: Pravidla létání L2* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
- [5] *EBee X Fixed-Wing Drone* [online]. [cit. 2021-02-17].  
Dostupné z: <https://www.sensefly.com/drone/ebec-x-fixed-wing-drone/>
- [6] *Spreading Wings S1000: DESIGNED FOR HIGH LEVEL PROFESSIONAL AERIAL PHOTOGRAPHY AND CINEMATOGRAPHY* [online]. [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/spreading-wings-s1000>
- [7] *The Drones Mag: Configure OpenPilot CC3D Evo* [online]. [cit. 2021-02-13].  
Dostupné z: <http://www.thedronesmag.com/configure-openpilot-cc3d-evo/>
- [8] *Hybrid VTOL Fixed-Wing UAV Manufacturers* [online]. [cit. 2021-02-13].  
Dostupné z: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/platforms/hybrid-vtol-uav-manufacturers/>
- [9] *Helvetis – Jabali VTOL* [online]. [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://helvetis.com/vtol-uav-isr/>
- [10] *Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework* [online]. [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: [https://www.nist.gov/system/files/documents/el/isd/ks/NISTSP\\_1011-I-2-0.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/el/isd/ks/NISTSP_1011-I-2-0.pdf)
- [11] *Potenciál využití dronů v Armádě České republiky* [online]. [cit. 2021-02-13].  
Dostupné z: <http://www.ozbrojeneslozky.cz/clanek/potencial-vyuziti-dronu-v-armade-ceske-republiky>
- [12] *Policejní drony* [online]. [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.policie.cz/clanek/policejni-drony.aspx>

- [13] *Komerční využívání dronů zažívá boom. Zároveň ale roste počet přestupků* [online]. [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: [https://www.irozhlas.cz/veda-technologie/technologie/komercni-vyuzivani-dronu-zaziva-boom-zaroven-ale-roste-pocet-prestupku\\_201505030930\\_kwinklerova](https://www.irozhlas.cz/veda-technologie/technologie/komercni-vyuzivani-dronu-zaziva-boom-zaroven-ale-roste-pocet-prestupku_201505030930_kwinklerova)
- [14] *Zákon 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* [online]. [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-49#p49b>
- [15] *Letecký předpis: Pravidla létání L2* [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: [https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2\\_cely.pdf](https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2_cely.pdf)
- [16] *Základní informace k regulačnímu rámci EU pro bezpilotní systémy* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/zakladni-informace-k-regulacnimu-ramci-eu-pro-bezpilotni-systemy/>
- [17] *ERules pro bezpilotní systémy (UAS) (nařízení (EU) 2019/947 a (EU) 2019/945)* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2020/11/eRules\\_UAS\\_CS\\_15-01-2021\\_v2-0.pdf](https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2020/11/eRules_UAS_CS_15-01-2021_v2-0.pdf)
- [18] *Jednotná evropská legislativa pro drony: Co znamená pro české hobby a profi piloty?* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://dronpro.cz/jednotna-evropska-legislativa-pro-drony-co-znamená-pro-ceske-hobby-a-profi-piloty>
- [19] *Prováděcí nařízení komise (EU) 2019/947* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=CS>
- [20] *Létejte zodpovědně – Registrace* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak\\_letame\\_nyni/registrace](https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak_letame_nyni/registrace)
- [21] *Létejte zodpovědně – Otevřená kategorie* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak\\_letame\\_nyni/kategorizace\\_provozu?clid=150](https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak_letame_nyni/kategorizace_provozu?clid=150)
- [22] *Provoz v rámci „Otevřené“ (Open) kategorie* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/otevrena-kategorie-open/provoz-v-ramci-otevrene-open-kategorie/>
- [23] *Úřad pro civilní letectví – Specifická kategorie (SPECIFIC)* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/specificka-kategorie-specific/>

- [24] *Létejte zodpovědně – Specifická kategorie* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak\\_letame\\_nyni/kategorizace\\_provozu?clid=151](https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak_letame_nyni/kategorizace_provozu?clid=151)
- [25] *Létejte zodpovědně – Certifikovaná kategorie* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak\\_letame\\_nyni/kategorizace\\_provozu?clid=152](https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak_letame_nyni/kategorizace_provozu?clid=152)
- [26] *Létejte zodpovědně – U-space* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/co\\_nas\\_ceka?clid=268](https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/co_nas_ceka?clid=268)
- [27] *Létejte zodpovědně – Geo-zóny* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak\\_letame\\_nyni/zemepisne\\_zony](https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak_letame_nyni/zemepisne_zony)
- [28] *Nářízení komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0945&from=EN>
- [29] *Třídy letadel (rozdělení podle technických parametrů)* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.djitelink.cz/cs/Novinky-clanky/legislativa/tridy-letadel-rozdeleni-podle-technickyh-parametru>
- [30] *Omezený prostor LKR10 UAS – opatření obecné povahy* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/wpcontent/uploads/2020/11/20201230162623731.pdf>
- [31] *Létejte zodpovědně – Přechodné období* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak\\_letame\\_nyni/prechodne\\_obdobi](https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/jak_letame_nyni/prechodne_obdobi)
- [32] *U-space aneb vzdušný prostor budoucnosti* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://dronetag.cz/2020/09/07/ospace-vzduzny.html>
- [33] *Amazon – DJI F550* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.amazon.ca/DJI-Multicopter-Quadcopter-Motor-Propeller/dp/B00GEKK44W>
- [34] *RC zoom – Modelářské elektromotory* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.rc-zoom.cz/modelarske-elektromotory-1-dil/>
- [35] *T-motor MN3510 KV700* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://store.tmotor.com/goods.php?id=339>

- [36] AUDRONIS, Ty. *Designing Purpose-Built Drones for Ardupilot Pixhawk 2.1* [online]. Birmingham: Packt Publishing, 2017 [cit. 2021-03-05]. ISBN 978-1-78646-916-8.
- [37] *T-motor P13x4.4 Prop-2PCS/PAIR* [online]. [cit. 2021-03-05].  
Dostupné z: <https://store.tmotor.com/goods.php?id=379>
- [38] *Astramodel – Přehledné informace o typech akumulátorů* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.astramodel.cz/cz/blog/prehledne-informace-o-typech-akumulatoru.html>
- [39] *OpenTX Základní pojmy: PPM, CPPM, PWM, PCM a S.BUS* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z:  
[https://www.opentx.cz/index.php/Základn%C3%AD\\_pojmy:\\_PPM,\\_CPPM,\\_PWM,\\_PCM\\_a\\_S.BUS](https://www.opentx.cz/index.php/Základn%C3%AD_pojmy:_PPM,_CPPM,_PWM,_PCM_a_S.BUS)
- [40] *Drátek – ESC regulátor* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z:  
<https://dratek.cz/arduino/1653-esc-regulator-otacek-pro-bezkartacove-motory-30a.html>
- [41] *Wikipedie – Modelářské Servo* [online]. [cit. 2021-03-05].  
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Modelářské\\_servo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Modelářské_servo)
- [42] *Wikipedia – Servo (Radio control)* [online]. [cit. 2021-03-05].  
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Servo\\_\(radio\\_control\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Servo_(radio_control))
- [43] KARAS, Jakub. *222 tipů a triků pro drony*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4874-7.
- [44] *DJI Store – N3* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z:  
[https://store.dji.com/cz/product/n3?from=menu\\_products](https://store.dji.com/cz/product/n3?from=menu_products)
- [45] *Ardupilot* [online]. [cit. 2021-03-05].  
Dostupné z: <https://ardupilot.org/index.php/about>
- [46] *PX4 autopilot* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://px4.io>
- [47] *QGroundControl – User Guide* [online]. [cit. 2021-03-05].  
Dostupné z: <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/index.html>
- [48] *Ladas model – Futaba t16sz* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z:  
<https://www.ladasmodel.cz/vysilace/futaba-t16sz-2-4ghz-mod-1--r7008sb/>
- [49] *Ardupilot – Quadplane overview* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z:  
<https://ardupilot.org/plane/docs/quadplane-overview.html>



- [50] *GeoSense – Hybrid Vertical Takeoff and Landing UAV* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://geosense.com.my/v3/product/>
- [51] *Skywalker X8 Installation manual* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: [https://hobbyking.com/media/file/x/-/x-8\\_manual.pdf](https://hobbyking.com/media/file/x/-/x-8_manual.pdf)
- [52] *Peckamodel – Graupner MC-20 Hott RC souprava* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/33020-mc-20-2-4ghz-hott-rc-souprava>
- [53] *PX4 User Guide – Hex Cube Black Flight Controller* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: [https://docs.px4.io/master/en/flight\\_controller/pixhawk-2.html](https://docs.px4.io/master/en/flight_controller/pixhawk-2.html)
- [54] *PX4 User Guide – Cube Wiring Quick Start* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: [https://docs.px4.io/master/en/assembly/quick\\_start\\_cube.html](https://docs.px4.io/master/en/assembly/quick_start_cube.html)
- [55] *PX4 User Guide – HEX/ProfiCNC Here2 GPS* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: [https://docs.px4.io/master/en/gps\\_compass/gps\\_hex\\_here2.html](https://docs.px4.io/master/en/gps_compass/gps_hex_here2.html)
- [56] *GitHub–PX4–Autopilot* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://github.com/PX4/PX4-Autopilot>
- [57] *PX4 User Guide–PX4 Flight Modes Overview* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: [https://docs.px4.io/master/en/getting\\_started/flight\\_modes.html#manual\\_stabilize\\_d\\_mc](https://docs.px4.io/master/en/getting_started/flight_modes.html#manual_stabilize_d_mc)
- [58] *Hobbypartz T-motor AT2820-7 KV830* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.hobbypartz.com/02p-motor-334-at2820-kv830.html>
- [59] *T-motor AIR 40A 6S* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://store.tmotor.com/goods.php?id=368>
- [60] *T-motor T 60A* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://store.tmotor.com/goods.php?id=375>
- [61] *Peckamodel – GENS ACE LIPO TATTU serie - 6750 mAh 14,8V 4S1P (25C)* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/ta-25c-6750-4s1p-gens-ace-lipo-tattu-serie-4s-6750-mah-25c>
- [62] *ECalc online calculator* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.ecalc.ch/index.htm>
- [63] *PX4 User Guide – Radio Control Systems* [online]. [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: [https://docs.px4.io/master/en/getting\\_started/rc\\_transmitter\\_receiver.html](https://docs.px4.io/master/en/getting_started/rc_transmitter_receiver.html)

## 10 SEZNAM POJMŮ

<b>3D</b>	3 Dimension	Trojrozměrný
<b>ABS</b>	Acrylonitrile butadiene styrene	Akrylonitrilbutadienstyren
<b>AGL</b>	Above Ground Level	Nad úrovní země
<b>API</b>	Application Programming Interface	Rozhraní pro programování aplikací
<b>APM</b>	ArduPilot Mega	
<b>ASA</b>	Acrylonitrile styrene acrylate	Akrylonitril styren akrylát
<b>ATTI</b>	Attitude	
<b>ATZ</b>	Aerodrome Traffic Zone	Letištní zóna neřízeného letiště
<b>BEC</b>	Battery Eliminator Circuit	Stabilizátor napětí
<b>BLDC</b>	Brush Less Direct Current	Bezkartáčový stejnosměrný motor
<b>BVLOS</b>	Beyond Visual Line Of Sight	Mimo dohled pilota
<b>CAD</b>	Computer Aided Design	Počítačem podporované projektování
<b>CCW</b>	Counter Clockwise	Ve směru hodinových ručiček
<b>CISP</b>	Common Information System Provider	
<b>CTR</b>	Control Zone	Řízený okrsek letiště
<b>CW</b>	Clockwise	Proti směru hodinových ručiček
<b>CZE</b>	Czech Republic	
<b>ČR</b>		Česká republika
<b>EASA</b>	European Aviation Safety Agency	Agentura Evropské Unie pro bezpečnost letectví
<b>ESC</b>	Electronic Speed Controler	Elektronický regulátor otáček
<b>EU</b>	European Union	Evropská Unie
<b>FC</b>	Flight Controler	Řídící jednotka
<b>FMU</b>	Flight Management Unit	Jednotka řízení letu
<b>FPV</b>	First Person View	Pohled z první osoby
<b>GCS</b>	Ground Control Station	Pozemní stanice
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satelite System	Globální družicový polohový systém
<b>GPS</b>	Gloobal Position System	Globální poziční systém
<b>HW</b>	Hardware	
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit	Inerciální měřicí jednotka
<b>IO</b>	Input/Output	Vstup/výstup
<b>LED</b>	Light Emitting Diode	Elektroluminiscenční dioda
<b>Li-Pol</b>	Lithium Polymer	
<b>LKD</b>	Dangerous Area	Nebezpečný prostor
<b>LKP</b>	Prohibited Area	Zakázaný prostor
<b>LKR</b>	Restricted Area	Omezený prostor
<b>LUC</b>	Light UAS operator Certificate	
<b>MCTR</b>	Military Control Zone	
<b>MTOM</b>	Maximum Take Off Mass	Maximální vzletová hmotnost
<b>OSD</b>	On Screen Display	Informace zobrazené na obrazovce
<b>PC</b>	Personal Computer	Osobní počítač

<b>PCO</b>	Power Cut Off	Odpojovač napětí
<b>PDB</b>	Power Distribution Board	Distribuční deska
<b>PETG</b>	PolyEthylene Terephthalate Glycol	Polyetyléntereftalát – glykol
<b>PID</b>	Proportional Integral Derivate	Proporcionální, integrační a derivační
<b>PLA</b>	Polyactic Acid	Kyselina polymléčná
<b>PPM</b>	Pulse Position Modulation	Pulzně-polohová modulace
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation	Pulzně-šířková modulace
<b>QGC</b>	QGroundControl	
<b>RAM</b>	Random Access Memory	Paměť s náhodným přístupem
<b>RC</b>	Remote Control	Rádiové řízení
<b>RPM</b>	Revolutions per minute	Otáčky za minutu
<b>RTL</b>	Return To Launch	Návrat na pozici spuštění
<b>ŘLP</b>		Řízení letového provozu
<b>SDK</b>	Software Development Kit	Sada vývojových nástrojů
<b>SLZ</b>	Sport Flying Equipment	Sportovní Létačící Zařízení
<b>SORA</b>	Specific Operations Risk Assessment	
<b>STL</b>	Standard Triangle Language	Formát stereo litografického programu
<b>STS</b>	Standard scenario	Standardní scénář
<b>TRA</b>	Temporary Reserved Area	Dočasně vymezený prostor
<b>TSA</b>	Temporary Segregated Area	Dočasně vyhrazený prostor
<b>UAS</b>	Unmanned Aircraft System	Bezpilotní systém
<b>UAV</b>	Unmanned Aircraft Vehicle	Bezpilotní letadlo
<b>ÚCL</b>		Úřad pro civilní letectví
<b>USSP</b>	U-Space Service Provider	
<b>VLOS</b>	Visual Line Of Sight	Vizuální dohled pilota
<b>VTOL</b>	Vertical Take Off and Landing	Vertikální vzlet a přistání

# 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1, mapovací letoun SenseFly eBee X [5]</i> .....	6
<i>Obrázek 2, oktokoptéra DJI S1000 [6]</i> .....	7
<i>Obrázek 3, možnosti konfigurace motorů multikoptér [7]</i> .....	8
<i>Obrázek 4, Hybrid Helvetis – Jabali VTOL [9]</i> .....	9
<i>Obrázek 5, Bezpilotní rotorový universální systém (BRUS) Policie ČR [12]</i> .....	10
<i>Obrázek 6, Průkaz pilota</i> .....	13
<i>Obrázek 7, Přechodná období [31]</i> .....	18
<i>Obrázek 8, Rám hexakoptéry DJI550 [33]</i> .....	20
<i>Obrázek 9, Motor BLDC MN2212 výrobce T-Motor [35]</i> .....	21
<i>Obrázek 10, Kompozitní vrtule T-motor [37]</i> .....	22
<i>Obrázek 11, Popis Li-Pol akumulátoru [38]</i> .....	23
<i>Obrázek 12, ESC regulátor [40]</i> .....	24
<i>Obrázek 13, Modelářské servo [42]</i> .....	25
<i>Obrázek 14, Řídící jednotka DJI N3 [44]</i> .....	26
<i>Obrázek 15, RC vysílač a přijímač výrobce Futaba [48]</i> .....	28
<i>Obrázek 16, Schéma vzletu a přistání VTOL modelu [50]</i> .....	33
<i>Obrázek 17, CAD model navrhovaného letounu</i> .....	34
<i>Obrázek 18, RC souprava Graupner [52]</i> .....	35
<i>Obrázek 19, Parametry Pixhawk 2.1 [53]</i> .....	36
<i>Obrázek 20, Přehled portů na řídicí jednotce Pixhawk [53]</i> .....	37
<i>Obrázek 21, GPS Here 2 [55]</i> .....	38
<i>Obrázek 22, Schéma pohonu</i> .....	41
<i>Obrázek 23, Výsledné hodnoty programu eCalc</i> .....	48
<i>Obrázek 24, Model ramene</i> .....	50
<i>Obrázek 25, Náhled modelu z boční části</i> .....	50
<i>Obrázek 26, STL modely v programu PrusaSlicer</i> .....	51
<i>Obrázek 27, Rozměry ramene (mm)</i> .....	52
<i>Obrázek 28, Zhotovená ramena</i> .....	52
<i>Obrázek 29, Složený model</i> .....	53
<i>Obrázek 30, Rozložení modelu na tři díly</i> .....	53
<i>Obrázek 31, Laminátová konstrukce ke snížení vibrací</i> .....	54
<i>Obrázek 32, Připájené konektory MR60</i> .....	54

<i>Obrázek 33, Umístění a rotace motorů .....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 34, Zapojení Power Distribution Board .....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 35, Palubní elektroinstalace .....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 36, Rozmístění jednotlivých komponent uvnitř trupu.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 37, Ovládání RC vysílače v módu 2 [63] .....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 38, Nastavení typu letounu.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 39, Orientace řídicí jednotky .....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 40, Proces kalibrace kompasu .....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 41, Průběh nastavování RC vysílače.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 42, Bezpečnostní nastavení .....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 43, Fotografie z testovacího letu.....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 44, Poškozená ramena .....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 45, Graf získaných údajů gyroskopu.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 46, Graf hodnot akcelerometru.....</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 47, přibližné hodnoty akcelerometru.....</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 48, hodnoty měřených vibrací v řídicí jednotce.....</i>	<i>69</i>

## 12 SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1, Provozní omezení v podkategoriích A1-A3 [22]</i> .....	14
<i>Tabulka 2, Parametry letounu Skywalker X8 [51]</i> .....	34
<i>Tabulka 3, Parametry přijímače Graupner HoTT GR-24 [52]</i> .....	35
<i>Tabulka 4, Parametry motoru T-motor MN3510 KV700 [35]</i> .....	42
<i>Tabulka 5, Charakteristika motoru MN3510 KV700 [35]</i> .....	43
<i>Tabulka 6, Porovnání tahu motoru v kombinaci různých vrtulí</i> .....	43
<i>Tabulka 7, Parametry motoru T-motor AT2820-7 KV830 [58]</i> .....	44
<i>Tabulka 8, Parametry ESC regulátoru AIR 40 A [59]</i> .....	44
<i>Tabulka 9, Parametry ESC regulátoru T60 A [60]</i> .....	44
<i>Tabulka 10, parametry akumulátoru Tattu 6750 mAh [61]</i> .....	45
<i>Tabulka 11, Seznam využitých komponentů pro stavbu</i> .....	47
<i>Tabulka 12, Hodnoty zadané do programu eCalc</i> .....	48
<i>Tabulka 13, Vybrané hodnoty parametrů</i> .....	49

## 13 SEZNAM PŘÍLOH

*Příloha č.1 Nastavení řídicí jednotky v programu QGroundControl*