



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

Návrh konstrukce FPV dronu

Design of FPV Drone Structure

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Václav Cynyburk

Studijní program: B2341 STROJÍRENSTVÍ
Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem
Vedoucí práce: Ing. Josef Kamenický



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cynyburk** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **474076**
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
 Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
 Studijní program: **Strojirenství**
 Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh konstrukce FPV dronu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of FPV Drone Structure

Pokyny pro vypracování:

V rámci závěrečné práce proveďte rešerši konstrukčních řešení dronů. Rozpracujte zvolenou koncepci řešení. Uveďte způsob řízení dronu. Proveďte nezbytné návrhové výpočty klíčových konstrukčních uzlů. Vytvořte 3D model navrženého konstrukčního řešení a sestavný výkres celého zařízení.

Seznam doporučené literatury:

ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spoje a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008.
 ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Mechanické převody. Praha: ČVUT, 2003.
 KUGL, O. a kol.: Projekt - III. ročník. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005.


Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Josef Kamenický, ústav přístrojové a řídicí techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **04.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


 Ing. Josef Kamenický
 podpis vedoucí(ho) práce

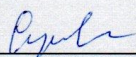

 Ing. František Jopot, Ph.D.
 podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


 prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
 podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.4.2021
 Datum převzetí zadání


 Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Václav Cynyburk
Název BP:	Návrh konstrukce FPV dronu
Anglický název:	Design of FPV Drone Structure
Rok:	2021
Studijní program:	B2341 STROJÍRENSTVÍ
Obor Studia:	3901R051 Konstruování podporované počítačem
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Josef Kamenický
Bibliografické údaje:	počet stran 52 počet obrázků 61 počet tabulek 4 počet příloh 3
Klíčová slova:	Drony, FPV drony, elektronické a konstrukční části dronů, konstrukce dronů, simulace výpočtových zatížení dronů, tah motoru
Key words:	Drones, FPV drones, electrical and construction parts of drones, construction of drones, simulation of calculation loads to drones, motor thrust
Anotace:	Tato práce se zabývá řešeršní částí na téma dronů. Výběr elektronických komponent a jejich zapojení. Konstrukčním návrhem FPV dronu, vytvořením 3D modelů a CAD výkresů sestav. MKP analýzou vypočtené tahové síly motoru.
Abstrakt:	This work deals with the research part on the topic of drones. Selection of electronic components and their connection. Construction design of FPV drone, creation of 3D models and CAD drawings of assemblies. CFD analysis of calculated thrust load.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma konstrukční návrh FPV drona vypracoval samostatně s užitím odborné literatury podle zásad vysokoškolských prací uvedené v seznamu literatury.

V Praze dne 30.4.2021

.....

Václav Cynyburk

Poděkování

Poděkování patří vedoucímu práce panu Ing. Josefu Kamenickému za odborné rady, ochotu a trpělivost při tvorbě bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod	8
2	Historie bezpilotních letounů (dronů).....	9
3	Rozdělení bezpilotních letounů (dronů)	13
4	Rozdělení podle počtu rotorů	14
4.1	Drony s pevnými křídly	14
4.2	Dron (vrtulník) s jedním rotorem	15
4.3	Hybridní dron s pevnými křídly	16
5	Využití dronů.....	16
5.1	Druhy dle využití:.....	16
5.1.1	Zemědělské	16
5.1.2	Archeologické	16
5.1.3	Záchranářské	17
5.1.4	Kontrolní.....	17
6	FPV dron	18
7	Popis konstrukčních prvků a elektroniky	18
7.1	Popis konstrukčních prvků	18
7.1.1	Rám.....	18
7.1.2	Podvozek.....	19
7.1.3	Vrtule	19
7.1.4	Ramena	20
7.1.5	Kryt	20
7.2	Elektronika	20
7.2.1	Motory	20
7.2.2	Elektronický regulátor otáček (ESC).....	21
7.2.3	Řídící jednotka letu	21
7.2.4	Rozvodná deska (PDB).....	22
7.2.5	Baterie	22
7.2.6	Ovladač a přijímač	23
7.2.7	GPS	23
7.2.8	Video vysílač	23
8	Volba kompatibilní elektroniky.....	24
8.1	Přehled elektronických součástek.....	24
8.2	Blokové schéma zapojení	25

8.2.1	Detailní schéma zapojení jednotlivých elektronických součástí	25
8.3	Rozměry elektronických součástek pro návrh rámu.....	26
9	Princip letu kvadrokoptéry	26
10	Výpočtový model	27
10.1	Dynamika pohybu	27
10.2	Odvození tahu motoru	27
10.3	Výpočet tahu motoru	29
10.3.1	Tabulka parametrů a koeficientů použitých ve výpočtu	29
10.4	Výpočet zrychlení.....	30
10.5	Výpočet rotace kolem osy X, Y a Z (pitch, roll, yaw)	31
10.6	Výpočet úhlového zrychlení.....	32
10.7	Výpočet úhlové rychlosti.....	33
11	Konstrukční řešení.....	34
11.1	Konstrukce rámu	34
11.2	Konstrukce nosného ramena.....	35
11.3	Konstrukce styčnicku	35
11.4	Konstrukce stojanu hlavní kamery	36
11.5	Konstrukce držáku FPV kamery	36
11.6	Konstrukce držáku hlavní kamery.....	37
11.7	Konstrukce zadního krytu.....	37
11.8	Sestavení součástí	38
12	MKP analýza	40
12.1	Zjednodušený model	40
12.2	Definice materiálu	40
12.3	Zatížení	41
12.4	Okrajové podmínky	41
12.5	Výsledky.....	41
12.6	Vyhodnocení MKP analýzy.....	43
13	Závěr.....	43
14	Použitá literatura.....	44
15	Seznam obrázků.....	49
16	Seznam tabulek.....	50
17	Seznam grafů	50
18	Seznam příloh.....	50
19	Seznam zkratk a symbolů	51

1 Úvod

Teoretická část bakalářské práce se zabývá postupný vznikem dronů ve světě a následně jejich vývojem po současnou dobu. Zmíněno je také jejich hlavní rozdělení, využití těchto dronů v průmyslu a také stručný úvod do FPV dronů. V neposlední řadě jsou popsány elektronické součástky a konstrukční díly FPV dronu. V praktické části je samotná volba těchto elektronických součástek, jejich ekonomické zhodnocení a zapojení. Dále je vysvětlen princip letu kvadrokoptéry. Ve výpočtové části je odvození tahové síly od motory a další dílčí výpočty. Práce obsahuje konstrukční návrh jednotlivých dílců pro FPV drona, model sestavy a CAD výkresy sestav konstrukčního návrhu. V závěru je provedena simulace zatížení vypočtenou tahovou silou a její vliv na konstrukci navrhovaného FPV dronu.

2 Historie bezpilotních letounů (dronů)

Bezpilotní letoun neboli dron je výraz určující rádiově ovládaný letoun pomocí ovladače. Průkopníkem bezpilotních letounů ovládaných dálkovým ovládním je považován Nicola Tesla, který si jako první v roce 1898 nechal patentovat tzv. teleautomation, což představovalo bezdrátovou komunikaci mezi dvěma zařízeními. Později se zjistilo, že měl sklony i ke konstrukci bezpilotního leteckého systému.

První použití bezpilotních letadel bylo již dříve v roce 1849, kdy Rakousko použilo balony plné výbušnin k zaútočení na Benátky.



Obrázek 1 – Ilustrační obrázek prvních bezpilotních letadel [2]

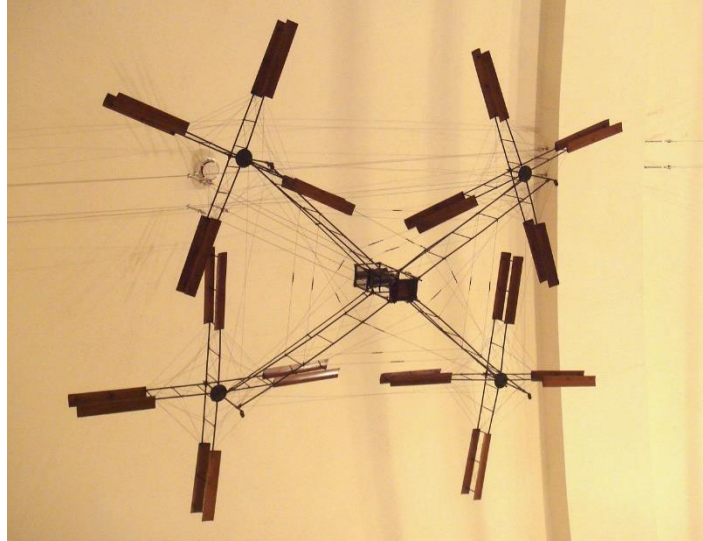
Na základě návrhů Nicolay Tesly byl vyvinut v roce 1916 první rádiově naváděný bezpilotní letoun Aerial Target britským konstruktérem Archibaldem Lowem. Aerial Target měl sloužit za války britské síle jako dálkově ovládané torpédo.

O rok později Američané vytvořili Kettering bug neboli vzdušné torpédo s gyroskopickým ovládním, které umělo zasáhnout do vzdálenosti 64 kilometrů, maximální rychlost letounu byla 209 km/h a první letové testy započaly v roce 1918.



Obrázek 2 – Bepilotní letoun nazývaný vzdušné torpédo [2]

V roce 1907 bratři Jacques a Louis Bréguetovi za pomoci profesora a fyziologa Charlese Richeta vyvinuli první letoun, který má prvky dnešních moderních kvadroptér, avšak nebyl považován za bezpilotní letoun z důvodu potřeby čtyř mužů k vyvažování konstrukce a první let dosáhl výšky pouhých 0,6 metru.



Obrázek 3 – Letoun bratrů Bréguetů [2]

Kromě bezpilotních letadel ovládaných jako torpéda na dálku po první světové válce v 30. letech 20. století vyvinuli britští konstruktéři Queen Bee přezdívanou jako včelí královnu, která byla rádiem řízený dron pro nácvik střelby na cíl.

Nejvýznamnějším dronem za 2. světové války byl německý V-1 Doodlebugs vybaven pulzejety a považován za první řízenou střelu. Použity byly v bombardování britských měst a systém byl vybaven několika gyroskopy a barometry pro ovládání výšky a směru letu.

Na konci 50. let se drony začaly spíše využívat jako průzkumná zařízení ke zjištění informací o bezpečnosti terénu v bojových oblastech např. ve vietnamské válce a jsou využívány doteď.

Vývoj dronů se přesouvá do Izraele, kde se v roce 1982 začaly používat bezpilotní letouny jako návnada a také ke zmatení nepřítele v boji se syrskou armádou. Následně se zjistilo, že použití dronů bylo velice užitečné a Amerika začala investovat do vývoje. Nejznámějším válečným dronem v této době byl americký MQ-1 Predator představen v roce 2000. Byl převážně využíván v Afghánistánu k odpálení raket na předurčený cíl a snaze najít Usámu bin Ládina.



Obrázek 4 – Armádní bezpilotní letoun MQ-1 Predator [2]

V posledních deseti letech došlo k velké inovaci dronů jak v technologii, tak i komerčního zájmu okolí. Dříve se drony používali pouze pro vojenské účely ovšem od roku 2010 jsou drony využívány v celé řadě odvětví.

Pokrok ve vývoji dronů je např. volné šíření globálního polohovacího systému (GPS) a rozšíření polohovacích systémů. Dále zásadní rozvoj pohonných baterií a jejich kapacit, rotorů, závěsných senzorů, řídicích jednotek a elektroniky.

Drony začali být vybavovány kamerami pro pořízení neběžných snímků nebo natáčení videoklipů. To je závěr spojení rádiem řízených letadel a dnešních moderních technologií smartphonů. Další pokrok je v samotné sestavě dronu, kde se ovládají 4 nebo více motory s určitou změnou otáček jednotlivých rotorů.

Nano drony se v posledních letech staly významnou součástí ve vojenském průmyslu, kde americká armáda začala používat tyto nano drony jako průzkumné systémy nesoucí název Black hornet neboli černá sršeň. Mají velikost dnešních moderních smartphonů, tichý chod a dobu letu 25 minut.

V současné době technologie dronů rostou exponenciálně a to také i zájem o drony, např. business Insider předpovídá zvednutí dodávek dronů do roku 2023 na 2,4 milionu dolarů, což je za rok o 66,8% hlavně v zemědělském, stavebnickém a telekomunikačním průmyslu.

Ve vojenském průmyslu se očekává zdokonalování kapacit baterií, doby letu, konstrukce a také schopností dronů.



*Obrázek 5 – Vojenský bezpilotní
letoun jménem černá sršeň [2]*



*Obrázek 6 – Obrazovka průzkumných
bezpilotních letounů [36]*

V této kapitole byla použita literatura [1], [2], [3], [4], [5], [40]

3 Rozdělení bezpilotních letounů (dronů)

Drony lze rozdělit podle několika aspektů, jako klíčový aspekt při dělení dronů je jejich využití např. fotografování, letecké mapování (průzkumné drony) apod. Dalším aspektem při členění dronů, který je potřeba si uvědomit, je rozdělení dronů pro zábavné účely nebo pro reálné využití v průmyslu. [6], [40]

Drony pro běžné uživatele, tedy pro zábavné účely, které většinou mají umístěnou kameru na těle dronu, se od sebe liší nejen konstrukcí dronu – velikost, celková hmotnost, ale také stabilizací letu, letovými vlastnosti a finální nižší cenou. V současné době se výrobní firmy snaží klást důraz na vývoj pokročilých dronů a jejich sériové výroby. Pokročilé drony mají větší konstrukci, lepší stabilitu letu, vysokou kvalitu pořízených fotografií nebo videoklipů a závěrečné výstupy se přibližují profesionálním dronům. [6], [40]



Obrázek 8 – Kvadrokoptéra [31]



Obrázek 7 – Kvadrokoptéra se spalovacím motorem [32]

Podle zaměření:

- a) Pro běžné uživatele
- b) Pro pokročilé uživatele
- c) Pro profesionály

Podle pohonu:

- a) Elektrický
- b) Spalovací

Podle počtu rotorů:

- a) Trikoptéry (3 rotory)
- b) Kvadrokoptéry (4 rotory)
- c) Hexakoptéry (6 rotorů)
- d) Oktooptéry (8 rotorů)

Podle typu:

- a) Multikopty
- b) S pevnými křídly
- c) Vrtulník s jedním rotorem
- d) Hybridní s pevnými křídly

4 Rozdělení podle počtu rotorů

Drony s více rotory jsou nejčastějším typem dronů používaným pro profesionální účely nebo zábavu. Nejběžnější využití je pro aplikaci snímkování, kde mohou nabídnout velkou řadu úhlu pohledu a vysokou kvalitu pořízených fotek nebo videí. Mají však i své zápory např. omezená doba letu, rychlost. Jsou nevhodné pro létání na velkou vzdálenost. Důvodem krátké doby letu je velké zpracování energie z baterie sloužící ke stabilizaci dronu. [6], [7], [8], [40]



Obrázek 9 – Dron s více rotory [7]

4.1 Drony s pevnými křídly

Drony s pevnými křídly jsou velmi odlišné svou konstrukcí oproti multikoptérám. Vypadají podobně jako dnešní cestovní letadla a používají křídlo k letu. Většina těchto dronů vyniká svou dobou letu, která je udávána až 16 hodin a jsou poháněny plynovým motorem. Účelem využití dronů s pevnými křídly je trasování nebo mapování okolí. Nevýhodou dronů s pevnými křídly je obtížná ovladatelnost, vysoká cena a potřeba vybavit záchytným zařízením (padák) nebo příslušnou přistávací drahou. [6], [7], [8], [40]



Obrázek 10 – Dron s pevnými křídly [7]

4.2 Dron (vrtulník) s jedním rotorem

Drony s jedním rotorem mají oproti dronům s více rotory pouze jeden rotor, který pohání hlavní vrtuli a vedlejší ocasní vrtuli. Ocasní rotor ovládá vybočení směru dronu a je používáno ve spojení nebo proti síle točivého momentu, která je udávána hlavním rotujícím rotorem. Ocasní rotor dronu nám vytváří boční tah stejně jako hlavní vrtule a mohou nastat 3 případy rotace:

1. Dron zůstává ve své poloze
 - Pokud se velikosti bočního tahu rovnají velikosti točivého momentu tvořeného z hlavního rotoru bude dron pouze v jedné poloze
2. Dron rotuje po směru hodinových ručiček
 - Pokud velikost bočního tahu bude větší, než točivý moment hlavního rotoru začne se dron otáčet po směru hodinových ručiček
3. Dron rotuje proti směru hodinových ručiček
 - Pokud velikost bočního tahu bude menší, než točivý moment hlavního rotoru začne dron rotovat proti směru hodinových ručiček

Mají vyšší doby letu a mohou být poháněny plynovými motory. Tyto stroje jsou velmi nákladné a také vyžadují určitý trénink pro samotném ovládní. [6], [7], [8], [40]



Obrázek 11 – Dron s jedním rotorem [7]

4.3 Hybridní dron s pevnými křídly

Hybridní drony s pevnými křídly jsou novou generací přepravních zařízení. Umožňují vzlétnout a přistát ve svislém směru a také využívají možnosti aerodynamiky ve výškách stejně jako u letadel s pevnými křídly. V dnešní době ho společnost Amazon chystá přenést do provozu k přepravě zásilek a poštovních balíků. [6], [7], [8], [40]



Obrázek 12 – Hybridní dron s pevnými křídly [2]

5 Využití dronů

Možností využití dronů jsou stovky a každým rokem vznikají nové inovace využití dronů. Nejpopulárnější využití dronů jsou tzv. FPV (first person view = pohled první osoby) dron, která přenášejí online přenos pohledu z kamery dronu přímo na displej vysílače, na displej mobilního telefonu nebo do FPV brýlí uživatelům. Pojem FPV vychází z hlediska, že uživatel vidí přesnou polohu letu dronu, tím má jednodušší ovládání a pořizování unikátních videí nebo snímků. Funkce FPV je vysvětlena v kapitole 6. [6], [8], [9], [40]

5.1 Druhy dle využití:

5.1.1 Zemědělské

- Drony se zde využívají k multispektrálním analýzám, kde se sleduje zdravotní stav rostlin, detekce povrchové variability a pomocí termokamery schopnost zjistit např. nedostatek živin nebo výskyt škůdců. [40]

5.1.2 Archeologické

- Používají se k vizuální dokumentaci prastarých památek v těžkém terénu. Skenování historických památek a budov pomocí 3D skenerů, kdy vzniká mračno bodů přesně zaměřených v prostoru a pomocí počítače je možné vytvořit poměrně přesný 3D model a k texturám objektů přiřadit vzhled z fotografií pořízených během letu. Nabízí detailní leteckou perspektivu a díky novým technologiím mohou být archeologové efektivnější při plánování výkopů. [9]

5.1.3 Záchranářské

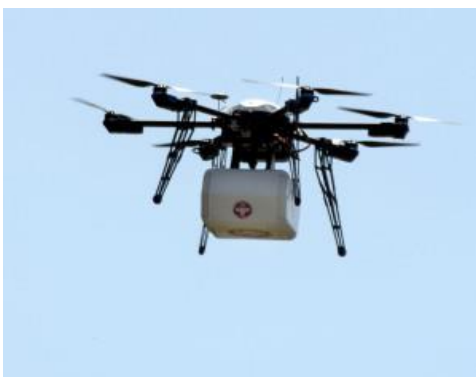
- Záchranářské drony se využívají k průzkumu špatně přístupných míst a jako prevence nemocí, kde dron je vybaven speciálním zařízením, které odebere vzorek např. z komárů, poté se vzorky analyzují v laboratoři, a to umožňuje včasnou předpověď virových ohnisek. [10]

5.1.4 Kontrolní

- Kontrolní drony jsou používány k inspekci vedení vysokého napětí, kde se především kontrolují spoje, izolátory a probíhá mechanická kontrola stožárů. Využívány jsou například policií ČR k průzkumu oblastí, inspekcí listů turbíny na větrných elektrárnách nebo k odhalení trhlin na vysílačích či komínech. [10]



Obrázek 13 – Multikoptéra používaná v zemědělském průmyslu [7]



Obrázek 14 – Záchranářský dron [10]



Obrázek 15 – FPV dron [42]

6 FPV dron

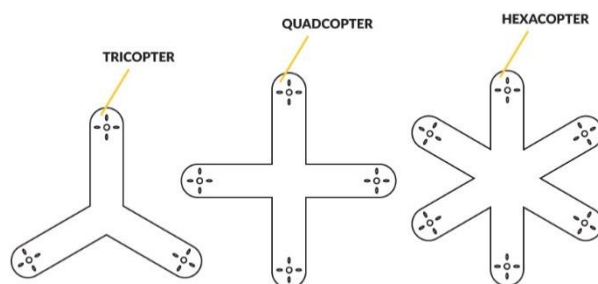
FPV dron je označení pro bezpilotní letoun (UAV) s přední kamerou, kde obraz je živě dálkově přenesen do jiného zařízení s displejem např. brýlí, které je vybaveno video přijímačem. Hlavním rozdílem od klasického dronu je, že uživatel má pohled první osoby dronu, nikoliv pouze z perspektivy na zemi, a tím zajištěné jednodušší ovládání manévru. FPV dron má odlišné aerodynamické vlastnosti letu oproti klasickému dronu a to, že je schopen docílit akrobatickými manévry např. přemet a jejich rychlost letu je podstatně vyšší. Tyto vlastnosti jsou velmi využívány při filmování kaskadérských záběrů. Základní vybavení FPV dronů je přední kamera s video vysílačem napojená na anténu. Pokročilejší drony mohou být vybaveni inteligentním hardwarem, GPS a zařízením autopilota s funkcí návratu na vzletové místo v případě ztráty signálu. FPV dron se může pohybovat i ve vyšších nadmořských výškách, což vyvolává určité obavy ohledně letecké bezpečnosti, a proto jsou zavedena bezpečnostní opatření, která omezují let v určitých oblastech. [18], [40], [42], [43]

7 Popis konstrukčních prvků a elektroniky

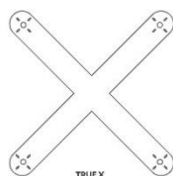
7.1 Popis konstrukčních prvků

7.1.1 Rám

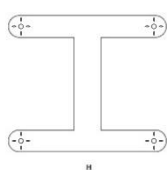
Jedná se o kostru dronu, která drží pohromadě všechny součásti potřebné pro let. Rám je definován počtem rotorů a jeho celkovou hmotností. Nejvíce používaným materiálem pro stavbu rámu je uhlíkové vlákno, které je lehké a zároveň vysoce pevné. Na každém ramenu je uložen motor s vrtulí, zatímco ve středu je uložena elektronika. Rozdělují se podle počtu motorů dronu a dále také podle tvaru, které jsou ukázány na Obrázcích 16, 17, 18, 19.



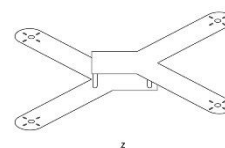
Obrázek 17 – Rámy dronů [13]



Obrázek 19 – Rám do „X“ [13]



Obrázek 18 – Rám do „H“ [13]



Obrázek 16 – Rám do „Z“ [13]

7.1.2 Podvozek

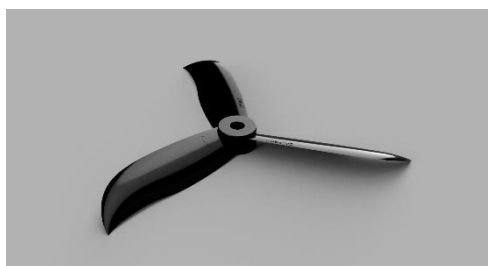
Slouží k ochraně jednotlivých motorů před dotykem země a dále také k ochraně větších kamer, které jsou umístěny pod dronem v úchopném systému. Absorbují celkovou tíhu při přistání a jsou konstruovány na několikanásobně větší sílu, která může vzniknout při razantním přistání. Udržují stabilitu dronu jak při vzletu, tak i přistání. Podvozky jsou konstruovány pevně nebo jako sklápěcí, kde je ovládání zatažení a vytažení podvozku pomocí dvou servo motorů umístěných v rámu dronu. Nejvíce používaným materiálem podvozku jsou vícevrstvé uhlíkové kompozity.



Obrázek 20 – Podvozek multikoptéry [40]

7.1.3 Vrtule

Konstrukční součást, na které vzniká potřebný aerodynamický vztlak pro vzlet dronu. Vztlak na vrtulích vzniká díky tvaru profilu a úhlu náběhu k proudícímu vzduchu. Velikost vztlaku je dána rotací vrtule a tím také vzniká větší proud vzduchu na vrtuli. List vrtule nemá po celé své délce stejnou geometrii a úhel náběhu se zmenšuje u konce listu. Výrobním materiálem vrtulí bývá polykarbonát, což je druh plastu s dobrou tuhostí a ohebností.



Obrázek 21 – Vrtule kvadroptér [34]

7.1.4 Ramena

Slouží k přenesení vztlakové síly motoru na celý rám. Na konci ramene bývají umístěny motory s ochrannými nárazníky k zamezení poškození motorů. Ramena musí být tuhá, dobře tlumit vibrace od motorů na rám a řešená pro vedení kabelů od motorů. Materiálem ramen bývají uhlíkové kompozity tvořené nejméně třemi vrstvami.



*Obrázek 22 – Nosné rameno
FPV dronů [33]*

7.1.5 Kryt

Kryt chrání elektroniku před pádem, prachem zviřeným během vzletu a přistání a také při nepříznivém počasí. Nezbytně nutný je dobrý odvod vzduchu k elektronice, aby nedocházelo k jejímu přehřátí a také svůj aerodynamický profil, na který bude vztahována stabilita soustavy ve vzduchu.

V této podkapitole byla použita literatura [13], [14], [15], [16], [18], [40]

7.2 Elektronika

7.2.1 Motory

Motory generují tahovou sílu, která je potřebná k letu dronu a musí být větší než celková tíha dronu. Nejčastěji se používají střídavé motory, které mají vyšší účinnost a spolehlivost oproti stejnosměrným. Vnitřní část se skládá ze statického vinutí a vrtule je připevněna k rotačnímu plášti. Specifikačním parametrem motorů bývá jejich výkon, pokud chceme dron s větší dobou letu používají se motory s výkonem 300-900 KV. Agresivnější a akrobatické drony používají silnější motory s výkonem od 1400 KV. Zkratka KV znamená „konstant velocity“ a udává maximální počet otáček na 1 volt, tedy pokud připojíme 12 V baterii bude motor se 1400 KV při zanedbání mechanických a elektrických ztrát rotovat 16 800 ot/min.



*Obrázek 23 – Motor
FPV dronů [11]*

7.2.2 Elektronický regulátor otáček (ESC)

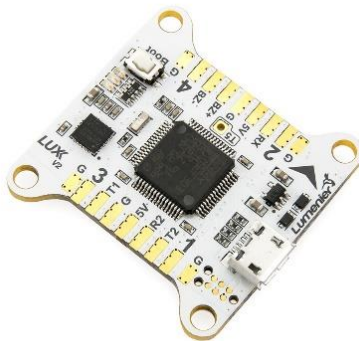
Elektronické regulátory otáček jsou vždy připojené ke každému motoru dronu, které přebírají příkazové výstupy z letového ovladače a předávají je motorům, jako je velikost otáček. Odebírají energii z rozvodné (PDB) desky a přeměňují to na třífázové impulsy, ze kterých jsou motory napájeny. Množství energie pak určuje rychlost rotace motoru. Každý rotor má vlastní ESC k sobě napájený z důvodu, že v daném okamžiku rotuje jinou rychlostí než ostatní ovlivněné vnějšími vlivy např. proudem vzduchu.



Obrázek 24 – Elektronický regulátor otáček FPV dronů [11]

7.2.3 Řídící jednotka letu

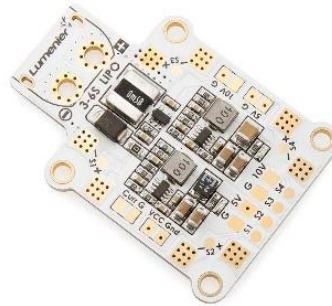
Řídící jednotka letu (flight control system) je mozek dronu. Shromažďuje data ze dvou vstupů a pomocí nich udržuje dron stabilní a určuje pohyb dronu ovládaného ovladačem. Oba datové výstupy vychází ze senzorů na letovém ovladači a sdělují palubnímu firmwaru orientaci dronu a odesílají příkazy motorům podle pokynu z ovladače. Řídící jednotky je možné naprogramovat podle přesných specifikací.



Obrázek 25 – Řídící jednotka letu FPV dronů [11]

7.2.4 Rozvodná deska (PDB)

Rozvodná deska odebírá energii z baterie a distribuuje jí do další letové elektroniky připojené k desce (např. elektronický regulátor otáček). Mohou obsahovat regulátory napětí, které budou mít výstup 5 V nebo 12 V a tím se zjednoduší samotné zapojení celého dronu, protože nebude potřeba připojovat regulátory motorů na rameno, ale rovnou do rozvodné desky.



Obrázek 26 – Rozvodná deska
FPV dronů [11]

7.2.5 Baterie

Drony jsou obecně napájeny lithium-polymerovými (LiPo) bateriemi, které se skládají až z 6 článků. Každý článek má napětí 3,7 V a každým článkem se napětí zvyšuje. Výhodou těchto baterií je nízká hmotnost a vysoká kapacita, zatímco nevýhodou je vyšší cena. Nabíjení těchto baterií je pomocí tzv. balanceru (balanční konektor) z důvodu nabití všech až 6 článků na stejnou mezní napěťovou hodnotu.



Obrázek 27 – Baterie [11]

7.2.6 Ovladač a přijímač

Rádiový přijímač je malé elektrické zařízení, které přijímá signály z rádiového ovladače uživatele a odesílá tyto informace do řídicího systému letu. Informace jsou odesílány vlnovým kmitočtem 2,4 GHz, tedy je to elektromagnetická neviditelná vlna šířící se v prostoru. Vysílače a přijímače jsou k sobě spárované, tedy nemůže dojít k příjmu jiných šířících se vln.



Obrázek 28 – Dálkový ovladač s gimbaly [11]

7.2.7 GPS

Drony využívají GPS (globální polohovací systém) k určení své pozice, stability letu nad zemí. Tvoří ji systémy: kosmický segment, řídicí a kontrolní segment a uživatelský segment (vlastní přijímač GPS signálu). Používají se hlavně v trasování okolí, kde zadáme určitou oblast a dron jí následně pomocí tohoto systému prozkoumá, tento systém může být využit např. i v postřiku rostlin v zemědělském průmyslu apod.

7.2.8 Video vysílač

Video vysílač je připojen k FPV kameře, která pomocí senzoru umístěné vpředu vytváří snímky. Snímky jsou přeměněny na data a poslány do video vysílače. K video vysílači je připojena anténa, které odesílá data na video přijímač umístěný na brýlích nebo pozemní stanici. Tato data jsou přenášena pomocí rádiových vln na displej brýlí.



Obrázek 29 – Video vysílač FPV dronů [35]

V této podkapitole byla použita literatura [11], [15], [17], [18], [41]

8 Volba kompatibilní elektroniky

Při volbě celkové elektroniky byl kladen důraz na kompatibilní připojení všech součástí elektroniky. Připojení elektroniky je bezpečné a nevyskytuje se zde žádný problém při samotném napájení na hlavní článek baterie. Největší možný proud, který by mohly motory odebírat při nejvyšší zátěži byl vyčíslen na 32 A podle [30] a to je v normě při zvolené 4v1 desce, která obsahuje ESC regulátory motorů s maximálním přípustným proudem 45 A. Dále byl přidán kondenzátor na rozvodnou desku ke kontaktům baterie, který obstarává funkci vyrovnávacích napětí (doporučuje se používat u Li-Po baterií s více než 3 články). [11], [30], [41]

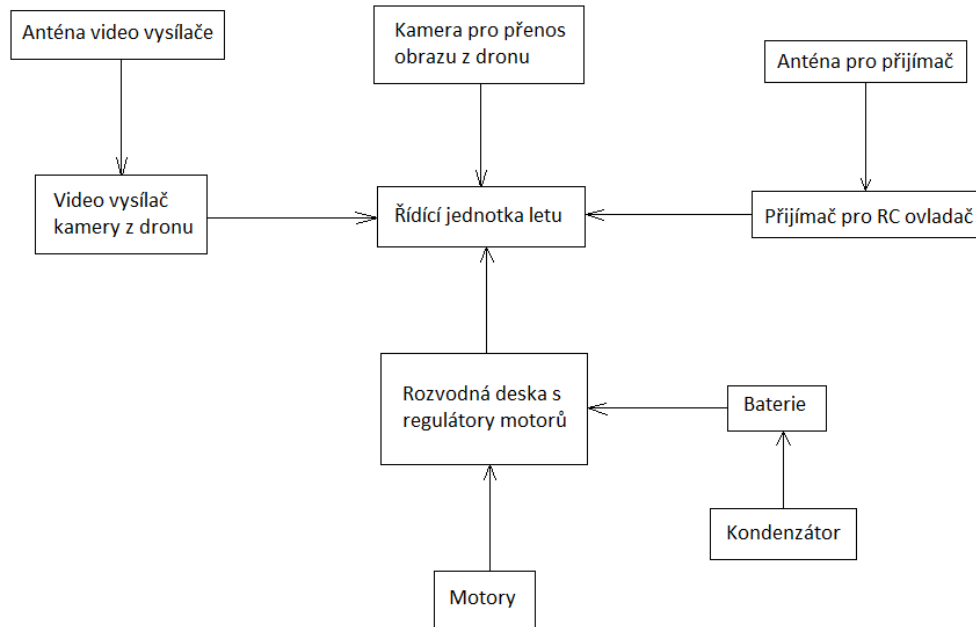
8.1 Přehled elektronických součástek

Tabulka 1 - Elektronické součásti

Komponent	Název - typ	Váha (g)	Cena (kč)
Řídící jednotka letu	iFlight SucceX-E Mini F4	7,6	1284
Rozvodná deska s regulátory motorů	SucceX-E Mini	14,4	Zahrnuta v řídicí jednotce letu
Motory	XILO 2207-2250 kV	32 x 4 = 128	443 x 4 = 1772
Baterie	XILO 4s Lipo	198	513
Kondenzátor	Panasonic 1000 μ F	1,4	47
FPV kamera	RunCam Eagle 3	9	933
Video vysílač FPV kamery	Eachine TX805	6	376
Anténa video vysílače	Rush Cherry	7	440
Přijímač pro RC ovladač	TBS Crossfire nano	0,5	700
Anténa pro přijímač	TBS Crossfire immortal T	3,4	140
Konstrukce	-	144	-
Kabely (odhad)	-	5	-
-	-	$\Sigma = 524,3$	-
RC ovladač	TBS Tango 2	-	3730
FPV brýle	Eachine EV 800	-	1270
Nabíječka baterie	ToolkitRC M6 V2.0	-	700
-	-	-	$\Sigma = 11\,905$

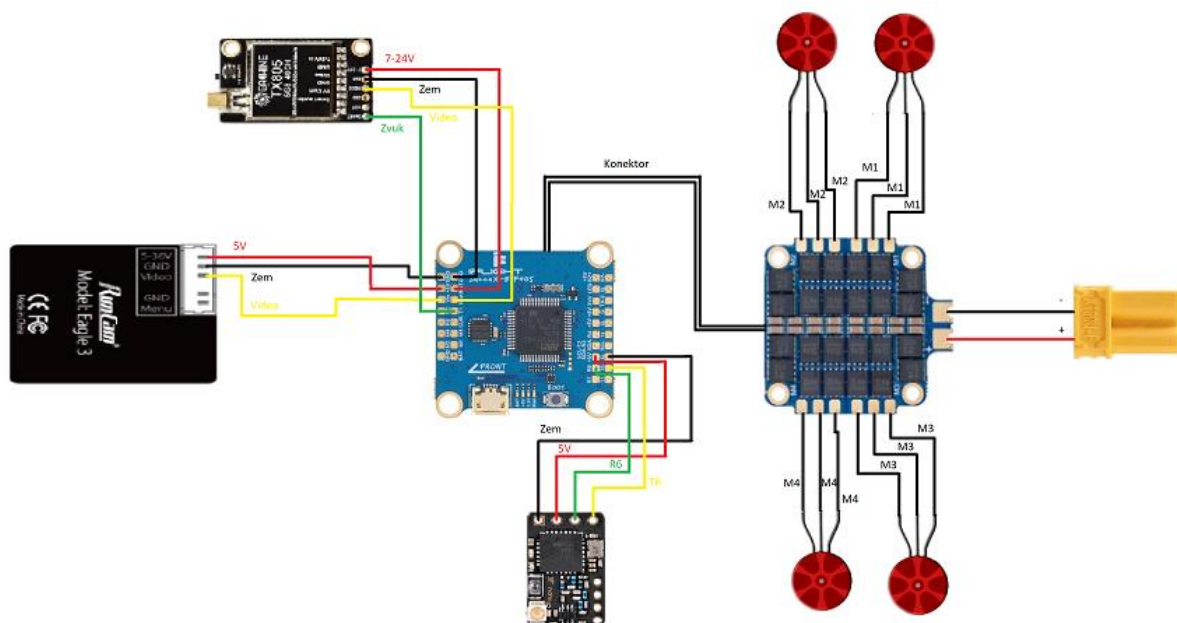
8.2 Blokové schéma zapojení

Všechny elektronické části uvedené v předchozí kapitole budou umístěny na rámu dronu a blokové schéma jejich zapojení je znázorněno na Obrázku 30.



Obrázek 30 – Blokové schéma zapojení

8.2.1 Detailní schéma zapojení jednotlivých elektronických součástí



Obrázek 31 – Detailní schéma zapojení [44]

8.3 Rozměry elektronických součástek pro návrh rámu

Tabulka 2 - Rozměrové velikosti elektr. součástek

Elektronická součástka	S – rozteč dě	$\varnothing d_a$ – průměr dír	a – délka	b – šířka	c – výška	$\varnothing d_h$ – průměr hříde
Řídící jednotka letu a rozvodná deska s regulátory	$S = 30,5 \text{ mm}$	$\varnothing d_a = 3 \text{ mm}$	$a = 43 \text{ mm}$	$b = 39 \text{ mm}$	$c = 17 \text{ mm}$	-
Video vysílač FPV kamery	$S = 30,5 \text{ mm}$	$\varnothing d_a = 2 \text{ mm}$	$a = 38,5 \text{ mm}$	$b = 22 \text{ mm}$	$c = 8 \text{ mm}$	-
Přijímač pro RC ovladač	-	-	$a = 18 \text{ mm}$	$b = 11 \text{ mm}$	$c = 4 \text{ mm}$	-
Baterie	-	-	$a = 74 \text{ mm}$	$b = 34 \text{ mm}$	$c = 40 \text{ mm}$	-
FPV kamera	-	$\varnothing d_a = 2 \text{ mm}$	$a = 20 \text{ mm}$	$b = 19 \text{ mm}$	$c = 19 \text{ mm}$	-
Motor	-	$\varnothing d_a = 3 \text{ mm}$	-	-	-	$\varnothing d_h = 5 \text{ mm}$

Rozměrové velikosti převzaty z literatury [44].

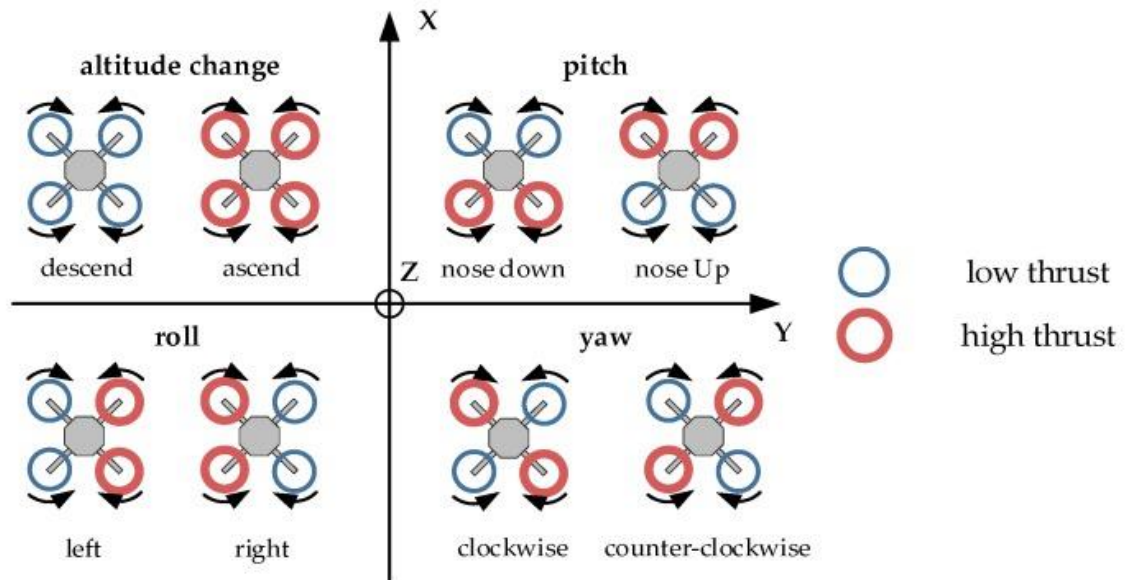
9 Princip letu kvadrokoptéry

Letový princip kvadrokoptéry spočívá ve vyvolání vztlaku na vrtulích, které jsou poháněny většinou sudým počtem střídavých motorů. Oproti vrtulníku se liší samotnou ovladatelností, kde není možné měnit úhel náběhu vrtulí, ale samotné pohyby a rotace jsou konány změnou velikostí otáček dvojicí rotorů, jak je vysvětleno v kapitole 10. Jednotlivé pohyby a rotace kvadrokoptéry jsou popsány v kapitole 10. V minulosti byl pokus i o trykoptéry, kde jeden rotor byl poháněn pomocí serva kvůli kompenzaci točivého momentu.

Konstrukce multikoptér bývá zpravidla složená z rámu, na kterém jsou připevněna ramena s motory většinou do tvaru „+“, aby ležely na jedné kružnici kolem společného těžiště.

Stabilitu a ovládání letu zprostředkovává řídicí jednotka (flight control), která má senzor detekující náklon (gyroskop), zrychlení (akcelerometr) ve všech třech osách. Výšku určenou změnou atmosférického tlaku, orientaci dronu (magnetometr) a polohu neboli pozici určenou pomocí GPS přijímače.

Kvadroptéry jsou vybaveny nejen motory, regulátory, řídicí jednotkou, vrtulemi ale také podvozkem, který je konstrukčně řešen na samou hmotnost soustavy a může být buď automaticky závěsný nebo na pevně připevněný. Jednotlivé konstrukční prvky a elektronika jsou popsány v kapitole 7. [12], [14], [26], [28], [40], [41]



Obrázek 32 – Princip letu kvadroptéry [14]

10 Výpočtový model

10.1 Dynamika pohybu

Kvadroptéra používá 4 motory na 4 ramenech, kde součástí motoru je vrtule. Bývá uspořádána do tvaru „+“. Každý z motorů vytváří svůj točivý moment M , tím nám vzniká i tahová síla F_T a třetí Newtonův pohybový zákon nám říká, že na každou akci existuje zpětná reakce, proto kvadroptéra má na opačné straně motor, který rotuje opačným směrem viz. obrázek 32. Na rozdíl od vrtulníku se kvadroptéra ovládá změnou velikostí momentů a tahových sil, kdežto u vrtulníku se naklápí listy vrtule.

Zákon akce a reakce v našem případě bude popsán rovnicí:

$$\sum_{i=1}^3 M_i = 0$$

10.2 Odvození tahu motoru

Odvození tahové síly je založeno na teorii hybnosti, která je obdobná jako u rotoru vrtulníku (teorie pohonu disku). Tahovou sílu lze formulovat rovnicí (1):

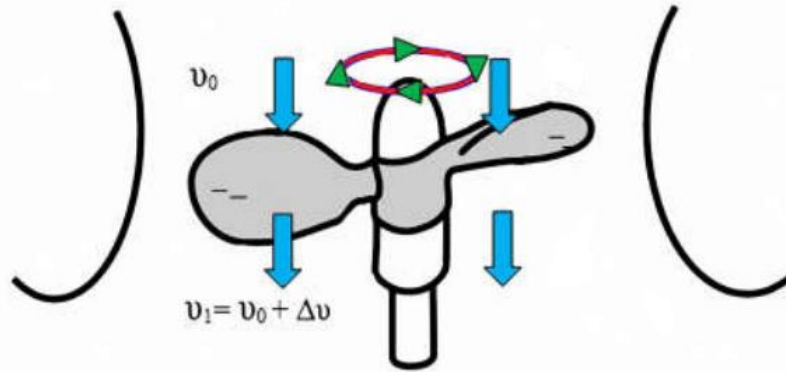
$$T = A \cdot \rho \cdot v \cdot \Delta v \quad (1)$$

T je tah [N], A je plocha rotoru vrtule [m^2]

ρ je hustota vzduchu [kg/m^3]

v je rychlost vzduchu na vrtuli [m/s]

Δv je rychlost vzduchu zrychlenou vrtulí [m/s^2]



Obrázek 33 – Proudění vzduchu na list vrtule [19]

Rovnici (1) budeme odvozovat podle odlišných typů vrtulových listů. Uvažujme plný výkon motoru bez ztrát průtoku vrtule a můžeme odvodit rovnice (2) a (3) hmotnostní toky a změny průtoku vzduchu uvedené níže:

$$\dot{m} = A \cdot \rho \cdot \Delta v \quad (2)$$

Zachování hybnosti:

$$F = \dot{m} \cdot v \quad (3)$$

\dot{m} je hmotností průtok [kg/s]

ρ je hustota vzduchu [kg/m^3]

v je rychlost vzduchu na vrtuli [m/s]

Δv je rychlost vzduchu zrychlenou vrtulí [m/s^2]

Energie dostupná rotací vrtule v proudu vzduchu je přeměněna na sílu proti gravitaci, která vytváří tah.

Zachování energetické rovnice lze psát rovnicí (4):

$$F \cdot \Delta v = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (4)$$

Dosazením rovnic (2) a (3) do rovnice (4) získáme:

$$\dot{m} \cdot v \cdot \Delta v = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot \Delta v \cdot v^2 \quad (5)$$

Dosazení rovnice (2) do rovnice (5) a následné zjednodušení:

$$A \cdot \rho \cdot \Delta v \cdot v \cdot \Delta v = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot \Delta v \cdot v^2 \quad (6)$$

$$v = 2 \cdot \Delta v \quad (7)$$

Dosazením rovnice (7) do rovnice (1) získáme:

$$T = 2 \cdot A \cdot \rho \cdot \Delta v^2 \quad (8)$$

Z obrázku (33) je plocha rotoru:

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (9)$$

R je poloměr vrtule [m]

Dosazením rovnice (9) do rovnice (8) získáme:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot \Delta v^2 \quad (10)$$

Z rovnice (10) je Δv rychlost vzduchu zrychlenou vrtulí odvozena rovnicí:

$$\Delta v = \frac{P}{T} \quad (11)$$

Kde P je výkon motoru předaný do vrtule [W]

T je tah [N]

Dosazením rovnice (11) do rovnice (10) získáme:

$$T = (2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot P^2)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Výkon se počítá na základě chodu motoru při daných otáčkách [ot/min]. Výkon motoru v [KV] převedeme na W a výkon vyjádřený rovnicí (13) dosadíme do konečné rovnice tahu (12).

$$P = 2250 \text{ kV} \rightarrow 735 \text{ W} \quad (13)$$

Otáčky se vypočítají ze vztahu (14) jako součin výkonu a přivedeného napětí.

$$n = Kv \cdot V \quad (14)$$

Kv představuje otáčky na volt z parametrů motoru. Napětí představuje přivedené napětí z baterie do motoru. [19], [20], [27]

10.3 Výpočet tahu motoru

10.3.1 Tabulka parametrů a koeficientů použitých ve výpočtu

Tabulka 3 - Výpočtové parametry

Parametr	Hodnoty
Vrtule	DAL Cyclone 5x4.6x3
Poloměr vrtule (R)	0,05 m
Pí (π)	3,14159
Hustota vzduchu (ρ)	1,225 kg/m ³
Výkon	735 W
Otáčky (n)	6 000 až 30 000 ot/min

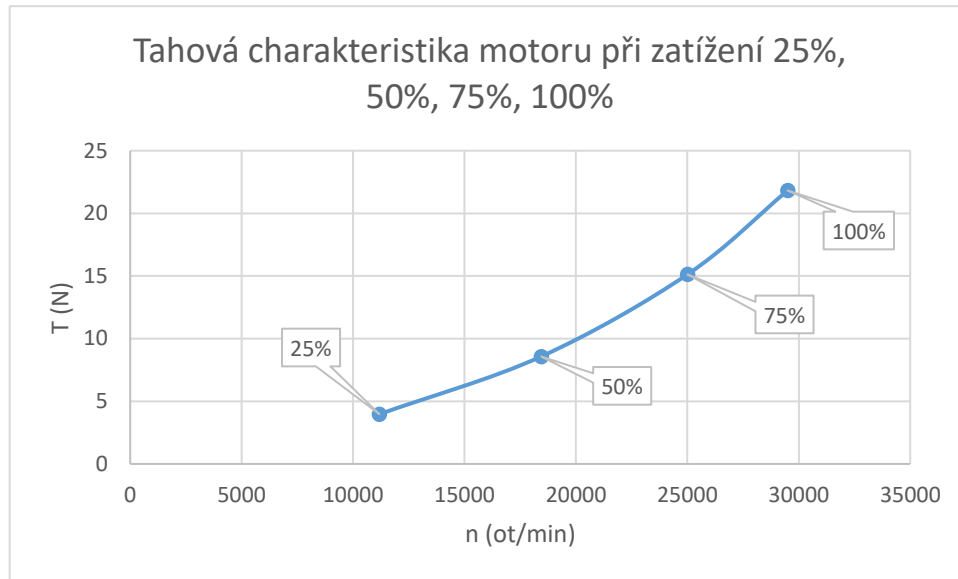
Tabulkové hodnoty převzaty z [19], [30].

Maximální otáčky, které motor je schopen vyvolat vypočítáme rovnicí (14):

$$n = Kv \cdot V = 2250 \cdot 15 = 33\,750 \text{ ot/min}$$

Do rovnice (12), která byla odvozena v předchozí kapitole dosadíme jednotlivé parametry z tabulky č. 3 a vypočítáme celkovou maximální tahovou sílu vyvolanou jediným motorem:

$$T = (2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot P^2)^{\frac{1}{3}} = (2 \cdot \pi \cdot 0,05^2 \cdot 1,225 \cdot 735^2)^{\frac{1}{3}} = 21,824 \text{ N}$$



Graf 1 – Tahová charakteristika motoru

- Graf tahové charakteristiky při daném zatížení motoru, kde naměřené hodnoty převzaty z [30].

V této kapitole byla použita literatura [19], [30]

10.4 Výpočet zrychlení

Pomocí 2. Newtonova pohybového zákona – zákon síly, který je definován rovnicí (15) spočteme zrychlení navržené kvadroptéry:

$$F = m \cdot a \quad (15)$$

m je celková hmotnost kvadroptéry [kg]

a zrychlení kvadroptéry [m/s^2]

F vektor tahových sil [N]

Výslednici tahových sil spočteme pouhým vektorovým součtem jednotlivých tahových sil generovaných motory dle rovnici (16):

$$F_{Tc} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = 4 \cdot 21,824 = 87,298 \text{ N} \quad (16)$$

Tíhovou sílu, která působí proti směru tahových sil a její působíště je umístěno uprostřed těžiště soustavy vypočteme z rovnice (17):

$$G = m \cdot g \quad (17)$$

m je celková hmotnost kvadrokoptéry [kg]

g je tíhové zrychlení [m/s^2]

Dosazením do rovnice (17), kde $m = 0,5243$ kg a $g = 9,81$ m/s^2 dostaneme:

$$G = 0,5243 \cdot 9,81 = 5,143 \text{ N}$$

Výslednou tahovou sílu vypočteme z rovnice (18), která je definována:

$$F_V = F_{Tc} - G \quad (18)$$

F_{Tc} je výslednice tahových sil [N]

G tíhová síla [N]

Dosazením rovnic (16) a (17) do rovnice (18) vypočteme výslednou tahovou sílu kvadrokoptéry:

$$F_V = F_{Tc} - G = 87,298 - 5,143 = 82,156 \text{ N}$$

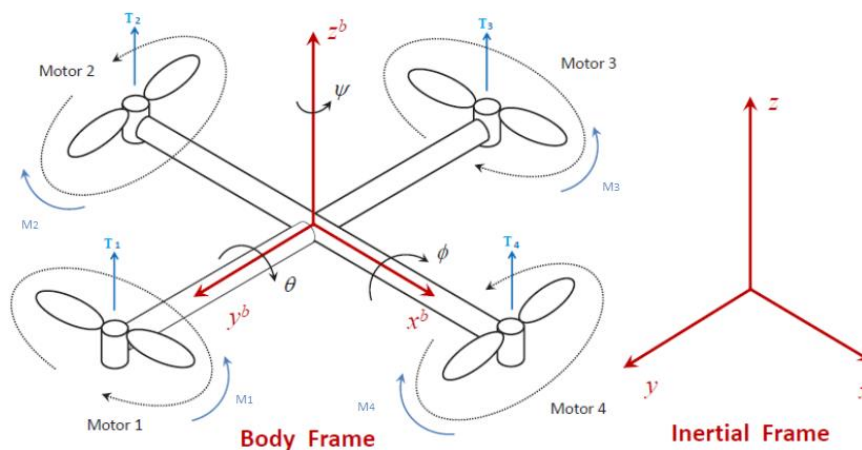
Úpravou rovnice (15) a dosazením vypočtených hodnot parametrů z rovnice (18) dostaneme:

$$a = \frac{F_v}{m} = \frac{82,156}{0,5243} = 156,7 \text{ m/s}^2$$

V této kapitole byla použita literatura [20], [23], [24]

10.5 Výpočet rotace kolem osy X, Y a Z (pitch, roll, yaw)

K rotaci kolem osy X nebo Y dochází v důsledku změny otáček dvojicí motorů po stranách. Jedna dvojice motorů zvýší své otáčky a druhá dvojice zůstane nezměněná nebo se otáčky sníží. Tím dojde k naklonění kvadrokoptéry buď podél osy X nebo Y viz. obrázek 34. Točivé momenty od motorů podél osy X, Y a Z popíšeme ve vztazích (19), (20), (21). [28]



Obrázek 34 – Schéma momentů a tahových sil kvadrokoptéry [28]

Moment podél osy X:

$$M(x) = (T_4 - T_2) \cdot l \quad (19)$$

T je tah motoru [N]

l je délka ramene motoru k těžišti dronu [mm]

Moment podél osy Y:

$$M(y) = (T_1 - T_3) \cdot l \quad (20)$$

T je tah motoru [N]

l je délka ramene motoru k těžišti dronu [mm]

Moment podél osy Z:

$$M(z) = (T_1 - T_2 + T_3 - T_4) \cdot l \quad (21)$$

T je tah motoru [N]

l je délka ramene motoru k těžišti dronu [mm]

Dosazením vypočtených parametrů z rovnice (12) a délky ramene $l = 116 \text{ mm}$ do momentové rovnice podél osy X (19) dostaneme:

$$M(x) = (T_4 - T_2) \cdot l = (21,824 - 0) \cdot 116 = 2\,531,58 \text{ N/mm}$$

Dosazením vypočtených parametrů z rovnice (12) a délky ramene $l = 116 \text{ mm}$ do momentové rovnice podél osy Y (20) dostaneme:

$$M(y) = (T_1 - T_3) \cdot l = (21,824 - 0) \cdot 116 = 2\,531,58 \text{ N/mm}$$

Dosazením vypočtených parametrů z rovnice (12) a délky ramene $l = 116 \text{ mm}$ do momentové rovnice podél osy Z (21) dostaneme:

$$\begin{aligned} M(z) &= (T_1 - T_2 + T_3 - T_4) \cdot l = (21,824 - 0 + 21,824 - 0) \cdot 116 \\ &= 5\,063,17 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

10.6 Výpočet úhlového zrychlení

Formulací 2. Newtonova pohybového zákona síly odvodíme pohybovou rovnici pro rotační pohyb (22) zápisem:

$$M = I \cdot \frac{d\omega}{dt} = I \cdot \varepsilon \quad (22)$$

M je vnější silový účinek působící na těleso [N/mm]

ω je úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

ε je úhlové zrychlení [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$]

I je moment setrvačnosti tělesa [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$]

Moment setrvačnosti udává míru setrvačnosti rotujícího tělesa. Pro tuhé těleso tvořené několika hmotnými body vyjádříme rovnicí (23) moment setrvačnosti zapsaný ve tvaru:

$$I = \sum_i m_i \cdot r_i^2 \quad (23)$$

m_i je hmotnost i -tého hmotného bodu [kg]

r_i je kolmá vzdálenost hmotného bodu od osy otáčení [m]

Moment setrvačnosti podél osy Y vyjádříme rovnicí (23), kde hmotnost hmotného bodu byla vyhodnocena na $m_h = 0,0822 \text{ kg}$ a kolmá vzdálenost hmotného bodu od osy otáčení $r_h = 0,08 \text{ m}$:

$$I_y = m_h \cdot r_h^2 = (4 \cdot 0,0822) \cdot 0,08^2 = 2,104 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Úpravou definované rovnice (22), dosazením parametrů z rovnice (23) a rovnice (20) vypočteme úhlové zrychlení na ose X zapsané ve tvaru:

$$\varepsilon_y = \frac{M_y}{I_y} = \frac{2,53158}{2,104 \cdot 10^{-3}} = 1\,203,222 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

Moment setrvačnosti podél osy X vyjádříme rovnicí (23), kde hmotnost hmotného bodu byla vyhodnocena na $m_h = 0,0822 \text{ kg}$ a kolmá vzdálenost hmotného bodu od osy otáčení $r_h = 0,096 \text{ m}$:

$$I_x = m_h \cdot r_h^2 = (4 \cdot 0,0822) \cdot 0,096^2 = 3,03 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Úpravou definované rovnice (22), dosazením parametrů z rovnice (23) a rovnice (19) vypočteme úhlové zrychlení na ose X zapsané ve tvaru:

$$\varepsilon_x = \frac{M_x}{I_x} = \frac{2,53158}{3,03 \cdot 10^{-3}} = 835,505 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

V této kapitole byla použita literatura [21], [22], [25]

10.7 Výpočet úhlové rychlosti

Úhlová rychlost je pouze teoretická, a to odhadem z celkového času při akrobatickém přemetu podél osy Y. Celkový čas rotace byl vyhodnocen na $t = 0,4 \text{ s}$ a úhlovou rychlost dopočteme v rovnici (24) definovanou: [21], [22], [23], [26]

$$\omega = \varepsilon \cdot t \quad (24)$$

ω je úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

ε je úhlové zrychlení [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$]

t je celkový čas při rotaci [s]

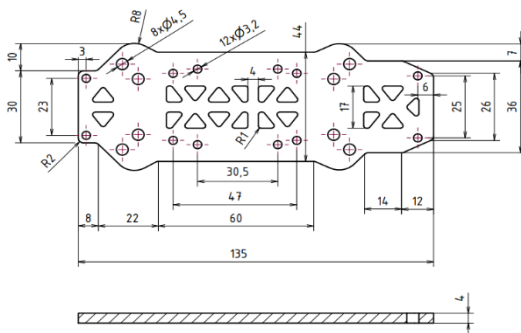
Po dosazení času $t = 0,4 \text{ s}$ dopočítáme rovnicí (24):

$$\omega = \varepsilon \cdot t = 1\,203,222 \cdot 0,4 = 481,289 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

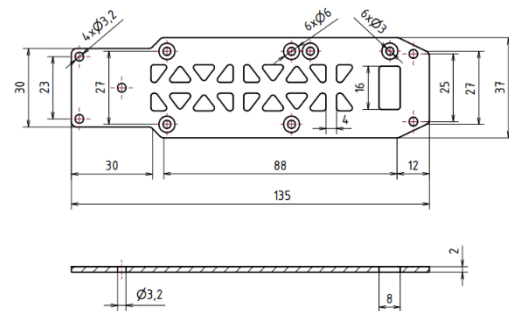
11 Konstrukční řešení

11.1 Konstrukce rámu

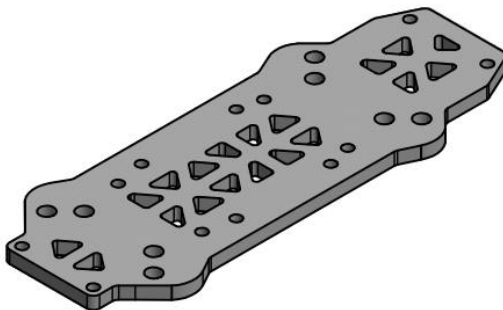
Rám tvoří základní část kvadroptéry, na kterém jsou umístěny hlavní elektronické prvky tzn. rozvodná deska s regulátory motorů, řídicí jednotka letu, přijímač pro dálkový ovladač, baterie, filmová kamera, video vysílač kamery z dronu, anténa video vysílače a anténa pro přijímač ovladače. Rám u daného konstrukčního řešení je rozdělen na 2 samostatné díly, a to horní a spodní rám. Horní rám nese baterii, která je pomocí suchého zipu připevněna k samotnému rámu a držák hlavní filmové kamery, který je přišroubován třemi šrouby M3x6 přes rám ke styčnickům. Prostor mezi spodním a horním rámem tvoří styčníky, které jsou s oběma rámy spojeny pomocí šroubových spojů. Horní rám kombinuje čtveřice různých šroubových spojů ISO 7045 M3x6, ISO 7045 M3x10, ČSN 4558 M3x8 a ČSN 4558 M3x16. Spodní rám obklopují čtyři nosná ramena, která jsou spojena šrouby ISO 4762 M4x16 na jejichž koncích jsou umístěny motory. Oba rámy jsou odlehčeny různými tvary ke snížení hmotnosti a tloušťka spodního rámu činí 4 mm, zatímco u horního rámu je tloušťka 2 mm. Materiál rámu a jeho vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 12. [39]



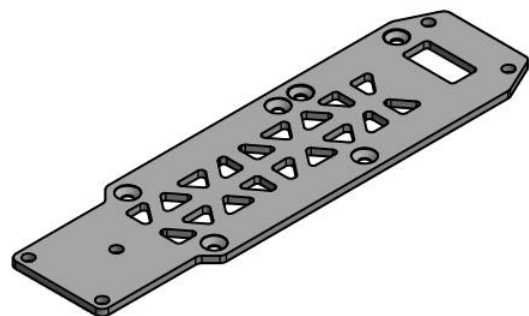
Obrázek 36 – Spodní rám 2D



Obrázek 35 – Horní rám 2D



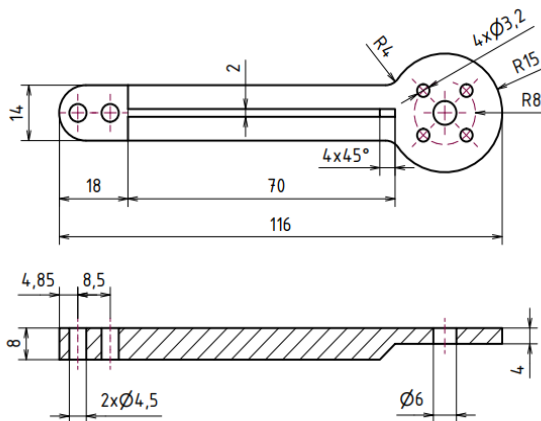
Obrázek 38 – Spodní rám 3D



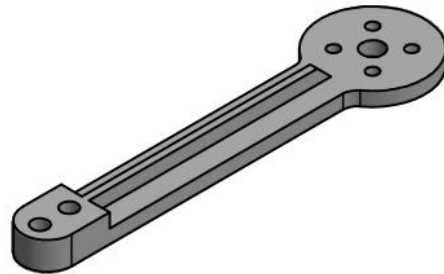
Obrázek 37 – Horní rám 3D

11.2 Konstrukce nosného ramena

Z názvu je patrné, že se jedná o nosnou součást kvadrokoptéry, na které dochází k největšímu namáhání z důvodu generování tahové síly motorem. Ten je s nosným ramenem spojen čtveřicí šroubů ISO 4762 M3x6. MKP analýza tohoto zatížení je řešena a detailně popsána v kapitole 12. Z tohoto důvodů byla konstrukce nosného ramene koncipována do průřezu tvaru T ke zvýšení tuhosti a ohybových vlastností, dále také zvětšená tloušťka u otvorů, které spojují nosné rameno s rámem. Nosná ramena jsou umístěna k rámu pod úhlem 45° a toto řešení se označuje pod zkratkou „+“. Materiál nosného ramena a jeho vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 12. [39]



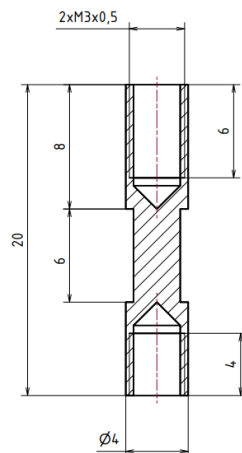
Obrázek 40 – Nosné rameno 2D



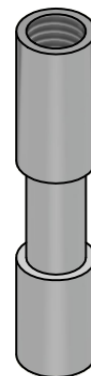
Obrázek 39 – Nosné rameno 3D

11.3 Konstrukce styčnicku

Styčníky tvoří nosnou podpěru mezi horním a spodním rámem. Mají z obou stran díry se závitem, do kterých jsou zašroubovány šrouby sloužící ke spojení obou rámců. Rozměrové veličiny jsou znázorněny na obrázku 41 a materiál styčnicků je uveden v kapitole 12. [39]



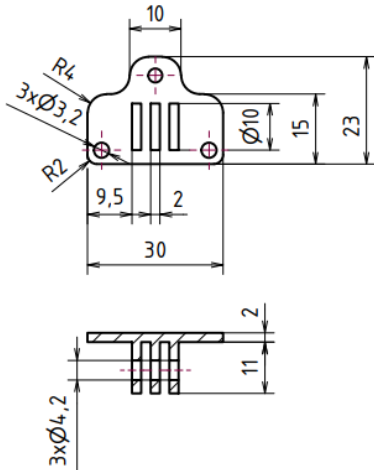
Obrázek 42 – Styčnick 2D



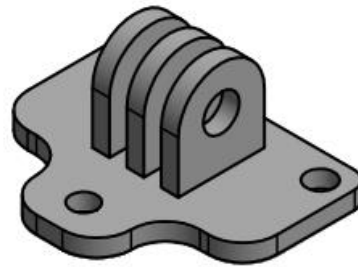
Obrázek 41 – Styčnick 3D

11.4 Konstrukce stojanu hlavní kamery

Konstrukce stojanu hlavní kamery je velmi jednoduchá, tvoří ji deska s trojicí otvorů, pomocí nichž je stojan šrouby uchycen k rámu. Dále jsou na desce tři úchopy pro instalaci držáku kamery. Šrouby použité k uchycení stojanu k rámu mají označení ISO 7045 M3x10 a šroub, který spojuje hlavní kameru se stojanem má označení ISO 4762 M4x12, kde na konci je uzavřená matice ČSN 4315 M4. Materiál stojanu a jeho vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 12. [39]



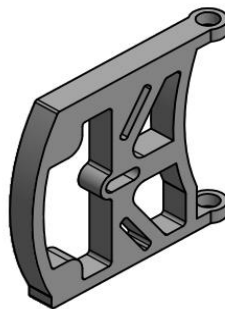
Obrázek 44 – Stojan hlavní kamery
2D



Obrázek 43 – Stojan hlavní kamery 3D

11.5 Konstrukce držáku FPV kamery

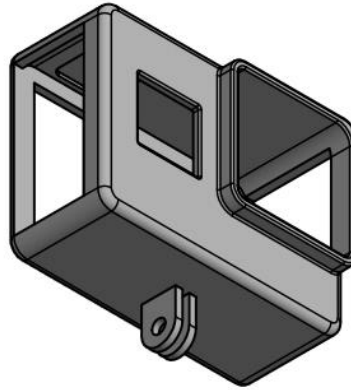
Konstrukce držáku FPV kamery se skládá ze dvou částí, které jsou pomocí šroubů spojeny na dvou místech, a to jak k hornímu, tak posléze i spodnímu rámu. Mezi tyto dvě části je vložena FPV kamera, která je ze stran na dvou místech uchycena dvěma šrouby ISO 4762 M2x6. Otvor pro tyto dva šrouby je konstrukčně vyřešen pomocí drážky z důvodu manipulace FPV kamery pro výhodný pohled. Úhel FPV kamery je možné vyřešit pomocí zmíněných šroubů, které přímo spojují FPV kameru. Materiál součástí a jeho vlastnosti je uveden v kapitole 12. [39]



Obrázek 45 – Rám pro FPV kameru 3D

11.6 Konstrukce držáku hlavní kamery

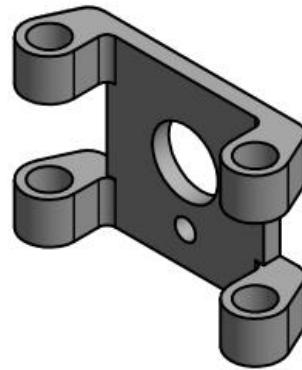
Držák hlavní kamery je velice jednoduchý a kopíruje tvar použití hlavní kamery, což je kamera typu Gopro Hero 8. Na stranách má 2 mm výstupky ke zlepšení uchycení kamery. Vyráběný materiál bude TPU, z důvodu lepší flexibility při instalaci hlavní kamery.



Obrázek 46 – Kryt hlavní kamery 3D

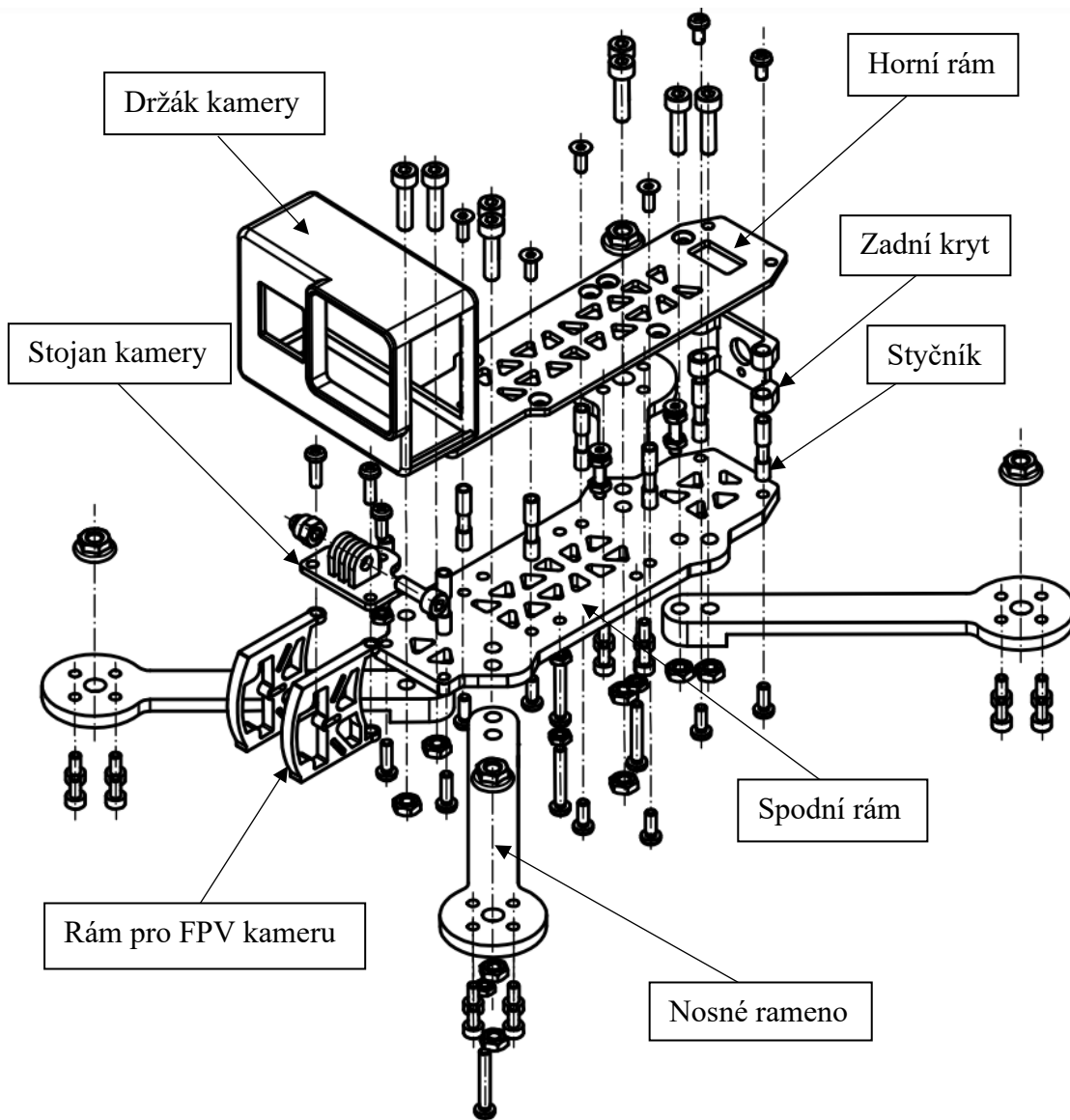
11.7 Konstrukce zadního krytu

Zadní kryt je tvořen dílem se čtveřicí otvorů o průměru 4,5 mm pro montáž styčnicků. Na těle zadní kryt nese další dva otvory, kde jedním z nich je otvor pro anténu video přenosu průměru 8 mm a druhý je otvor pro anténu přijímače ovladače o průměru 2,5 mm.

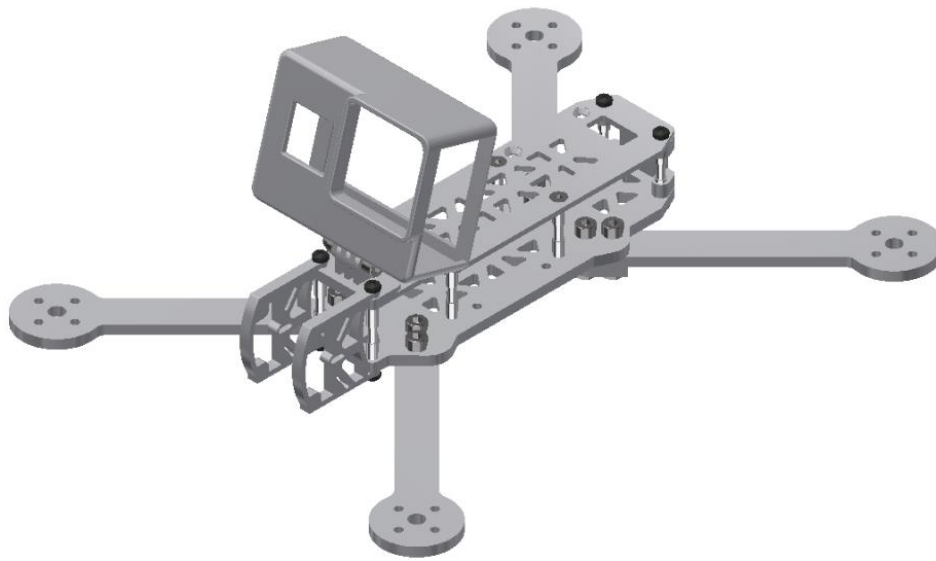


Obrázek 47 – Zadní kryt 3D

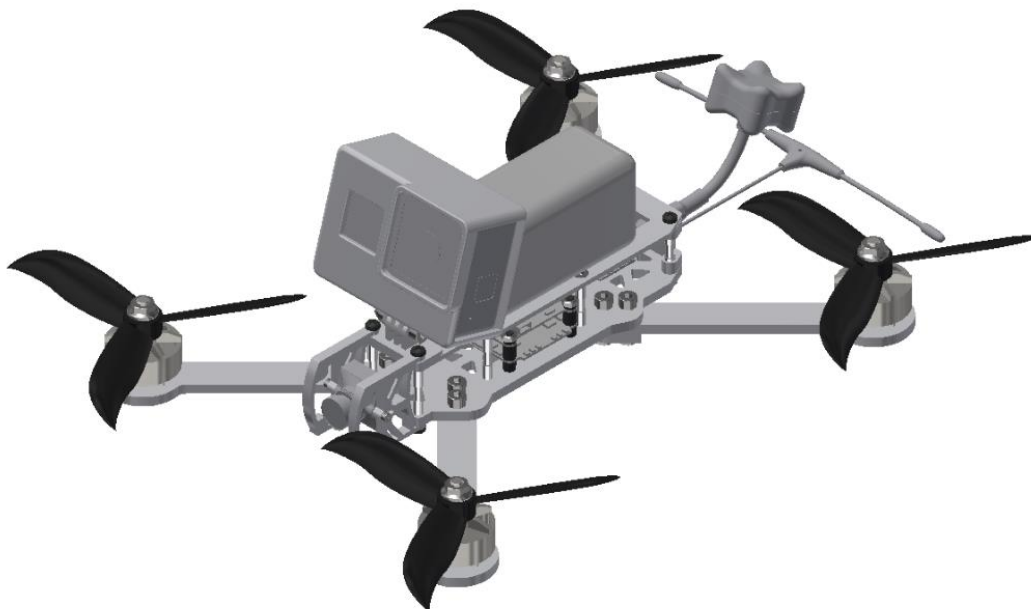
11.8 Sestavení součástí



Obrázek 48 – Konstrukční sestavení součástí



Obrázek 49 – Konstrukční sestava FPV dronu

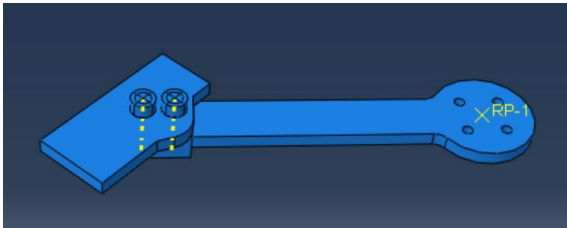


Obrázek 50 – Koncept FPV dronu

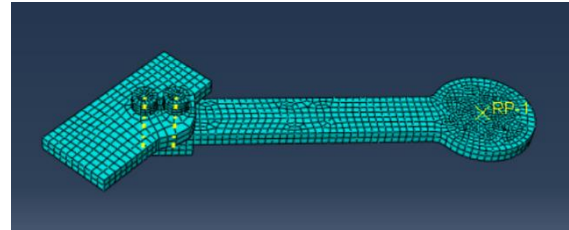
12 MKP analýza

12.1 Zjednodušený model

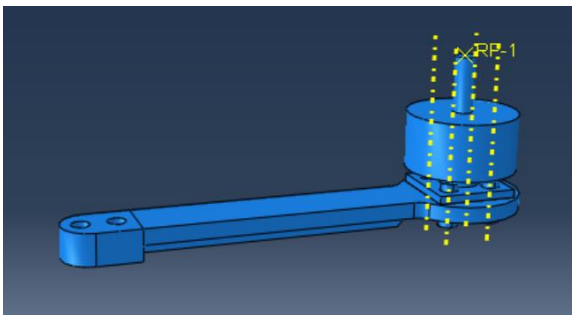
Byla vytvořena zjednodušená sestava nosného ramena uchyceného k samotnému rámu kvadrokoptéry pomocí šroubového spoje a na konci nosného ramene připojen zjednodušený model motoru, který je uchycen také šroubovým spojem. Spojení nosného ramene s rámem kvadrokoptéry je řešen šroubovým spojením o velikost ISO 4762 M4x16 a nosného ramene s motorem o velikosti ISO 4762 M3x6. [39]



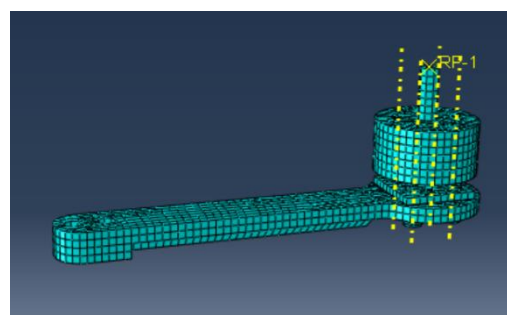
Obrázek 53 – Zjednodušený model dronu pro MKP



Obrázek 51 – Zjednodušený model dron s vytvořenou sítí



Obrázek 52 – Nosné rameno s motorem pro MKP



Obrázek 54 – Nosné rameno a motor s vytvořenou sítí

12.2 Definice materiálu

Nosné rameno a rám kvadrokoptéry budou vyráběny 3D tiskem a z toho důvodu je volen materiál PLA plast, šrouby jsou z oceli pevnostní třídy 8.8 a styčníky, které nesou horní rám kvadrokoptéry jsou definovány hliníkovou slitinou EN-AW-5754 ($AlMg_3$)

Tabulka 4 - Materiálové vlastnosti

Mechanické vlastnosti:	PLA	OCEL	HLINÍK
Hustota – ρ [kg/m^3]	1 252	7 850	2 670
Pevnost v tahu – R_m [MPa]	73	800	190
Yongův modul pružnosti – E [MPa]	3000	210 000	70 000
Poissonovo číslo μ [–]	0,36	0,3	0,33
Napětí na mezi kluzu - R_e [MPa]	70	-	-
Mez pevnosti v ohybu - σ_o [MPa]	106	-	-

Pozn.: všechny ostatní konstrukční součásti, které nejsou uvedeny v kapitole 12.2 budou vyráběny 3D tiskem z materiálu PLA. [37], [38], [45]

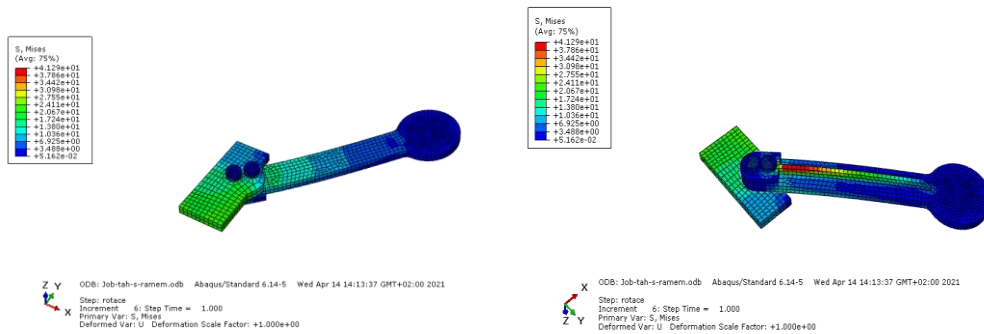
12.3 Zatížení

Simulace nosného ramene byla provedena pro tahovou sílu vypočtenou v kapitole (10.3) a to $F = 22\text{ N}$.

12.4 Okrajové podmínky

Byly vytvořeny 3 okrajové podmínky, symetrie ve směru X a Y na rámu kvadroptéry a zamezení pohybu uzlu v těžišti rámu.

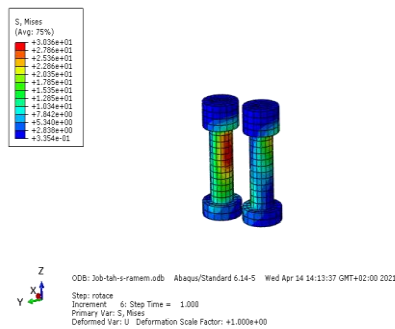
12.5 Výsledky



Obrázek 56 – Pole napětí HMH ($S, mises$) pohled shora

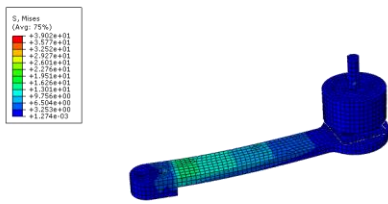
Obrázek 55 – Pole napětí HMH ($S, mises$) pohled zdola

Největší redukované napětí odečtené z nosného ramene $S_{max} = 41,29\text{ MPa}$

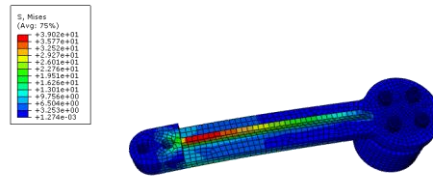


Obrázek 57 – Pole napětí HMH ($S, mises$) pohled shora na šrouby

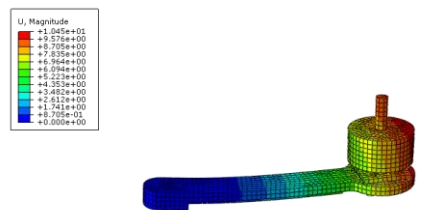
Největší redukované napětí odečtené ze šroubů $S_{max} = 30,36\text{ MPa}$



Obrázek 58 – Pole napětí HMH (S, mises) pohled shora



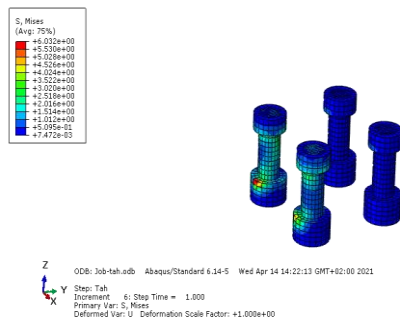
Obrázek 59 – Pole napětí HMH (S, mises) pohled zdola



Obrázek 60 – Pole posuvů (U, magnitude) pohled shora

Největší redukované napětí odečtené z nosného ramene $S_{max} = 39,02 \text{ MPa}$

Největší posuv odečtený z nosného ramene $U = 10,45 \text{ mm}$ a ve středu nosného ramene odečten $U = 4,353 \text{ mm}$



Obrázek 61 – Pole napětí HMH (S, mises) pohled shora na šrouby

Největší redukované napětí odečtené ze šroubů $S_{max} = 6,03 \text{ MPa}$

12.6 Vyhodnocení MKP analýzy

Bylo vyhodnoceno pevnostní namáhání nosného ramene a rámu kvadroptéry při maximálním tahu každého z motorů $F = 22 \text{ N}$. Jednotlivé dílčí výsledky byly zpracovány pomocí programu Abaqus a vytvořen sled operací při tvorbě analýzy. Došlo k úpravě nosného ramene, kde bylo přidáno žebro z důvodu velkého průhybu, které kopíruje střed ramene a byla zvětšena tloušťka stěny v místech otvorů pro šroubové spoje. Z této modifikace vyplývá, že největší napětí vzniká na přechodu mezi otvory pro šroubové spoje a žebra, kde bylo odečteno $S = 41,29 \text{ MPa}$, na šroubech bylo odečteno napětí $S = 30,07 \text{ MPa}$ a v místech ke středu rámu vyhodnoceno $S = 30,36 \text{ MPa}$. Samotný posuv ramene při maximálním zatížení motoru byl odečten $U = 10,45 \text{ mm}$. Zjištěné napětí v místech šroubových spojů, které spojují motor s nosným ramenem bylo odečteno $S = 6,03 \text{ MPa}$. Výsledná napětí jsou pod hranicí maximálních materiálových hodnot pevnostní v tahu, mezi kluzu, pevností v ohybu a lze konstatovat, že konstrukční řešení kvadroptéry vyhovuje zatížením.

13 Závěr

V úvodu bakalářské práce je přiblížení historie dronů od počátku vzniku až po současnou dobu, kdy se často využívají ve vojenském průmyslu. Posléze je uvedeno rozdělení dronů, jejich částečné využití v dnešním průmyslu a nakonec v úvodu je čtenář seznámen s tématem FPV dron.

Teoretická část obsahuje popis jednotlivých konstrukčních a elektronických součástí využívaných u dnešních FPV dronů, jejich volbu pro koncepční návrh této bakalářské práce a finanční vyhodnocení těchto součástí. Dále je zde uvedena kapitola výpočtů, která obsahuje odvození tahové rovnice, výpočet momentů kolem os při pohybu kvadroptéry, zrychlení a v poslední řadě také vysvětlení za jakých podmínek je dron schopen vzletu podle základních Newtonových zákonů.

Praktická část se zabývá konstrukčním řešením FPV dronu, kde byl navržen celkový rám s nosnými rameny a uspořádání celé sestavy i s nutnými elektronickými prvky u FPV dronu. Dále také byla v práci vypracována pevnostní analýza nosného ramene pro simulaci tahové síly. Na základě výsledků této analýzy byla provedena optimalizace konstrukce ramene, a to přidáním žebra a zvětšením tloušťky ramene. Díky této optimalizaci konstrukce vyhovuje zatížení za předpokladu použití dílů vyráběných 3D tiskem a použití materiálu PLA. Závěrem praktické části je tvorba CAD modelů všech součástí a technická dokumentace sestav, kde první sestava obsahuje pouze konstrukční části a druhá sestava disponuje i elektronickými částmi.

Bakalářská práce výrazně rozšířila autorovi jednak technické znalosti v oblasti dronů a samotné konstrukci dílů vyráběných 3D tiskem, tak i znalosti programů Autodesk Inventor, Abaqus, a proto tato problematika byla pro autora naučná a přínosná.

14 Použitá literatura

- [1] READE, Leslie. Bombs over Venice. In: Historytoday.com [online]. ©2021 [cit. 2021-1-12]. Dostupné z: <https://www.historytoday.com/archive/bombs-over-venice>
- [2] VYAS, Kashyap. A Brief History of Drones: The Remote Controlled Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). In: Interestingengineering.com [online]. Jun 29, 2020, ©2021 [cit. 2021-1-12]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/a-brief-history-of-drones-the-remote-controlled-unmanned-aerial-vehicles-uavs>
- [3] NESTA. Drones: a history of flying robots. In: Nesta.org.uk [online]. ©2021 [cit. 2021-1-13]. Dostupné z: <https://www.nesta.org.uk/archive-pages/drones-a-history-of-flying-robots>
- [4] MARTINEZ, Kennedy. The History Of Drones (Drone History Timeline From 1849 To 2019). In: Dronethusiast.com [online]. © 2014 - 2021 [cit. 2021-1-13]. Dostupné z: <https://www.dronethusiast.com/history-of-drones>
- [5] NEVADA INSTITUTE FOR AUTONOMOUS SYSTEMS. The Evolution Of Commercial Drone Technology. In: Nias-uas.com [online]. Oct 17, 2018, ©2021 [cit. 2021-1-13]. Dostupné z: <https://nias-uas.com/evolution-commercial-drone-technology>
- [6] HASSANALIAN, M. a A. ABDELKEFI, 2017. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences [online]. May 2017, 91, 99-131 [cit. 2021-1-13]. ISSN 0376-0421. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042116301348>)
- [7] CIRCUITS TODAY. Types of Drones – Explore the Different Models of UAV’s. In: Circuitstoday.com [online]. © 2020 [cit. 2021-1-18]. Dostupné z: <https://www.circuitstoday.com/types-of-drones>
- [8] SREEKAR, Anne. Types Of Drones. In: Medium.com [online]. May 17, 2020 [cit. 2021-1-18]. Dostupné z: <https://medium.com/@sreekaranne000/types-of-drones-3f01be7a21d>
- [9] MINAŘÍK, Petr. Projekt ArAGATS - archeologie s využitím dronu. In: Droncentrum.cz [online]. 23. 02. 2016, ©2021 [cit. 2021-1-18]. Dostupné z: <http://www.droncentrum.cz/archeologie-s-vyuzitim-dronu>
- [10] SVĚT DRONŮ. TOP 5 neuvěřitelných využití pro drony. In: Svetdronu.net [online]. 15. 8. 2015, ©2021 [cit. 2021-1-18]. Dostupné z: <https://svetdronu.net/top-5-neuveritelnych-vyuziti-pro-drony>

- [11] GETFPV. A Beginner's Guide to FPV. In: Getfpv.com [online]. ©2018, 2 Feb 2018 [cit. 2021-1-24]. Dostupné z: <https://www.getfpv.com/learn/new-to-fpv/fpv-beginner-guide>
- [12] RISING, Jordan. How Drones Work. In: Flight-evolved.com [online]. © 2017 [cit. 2021-1-28]. Dostupné z: <http://flight-evolved.com/buyers-guide/how-drones-work>
- [13] GETFPV. All About Multirotor Drone FPV Frames. In: Getfpv.com [online]. ©2018, 2 Feb 2018 [cit. 2021-2-3]. Dostupné z: <https://www.getfpv.com/learn/new-to-fpv/fpv-beginner-guide>
- [14] WALISZKIEWICZ, Michał, Konrad WOJTOWICZ, Zdzisław ROCHALA a Eulalia BALESTRIERI, 2020. The Design and Implementation of a Custom Platform for the Experimental Tuning of a Quadcopter Controller. In: Sensors [online]. © 2017 [cit. 2021-2-3]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s20071940
- [15] OSCAR LIANG, 2020. HOW TO GET STARTED WITH FPV DRONE. In: Oscarliang.com [online]. © 2013-2021, 19th August 2020 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://oscarliang.com/fpv-drone-guide>
- [16] THORBURN, Callum. Designing Your First FPV Drone Frame. In: Getfpv.com [online]. ©2018, July 11, 2018 [cit. 2021-2-3]. Dostupné z: <https://www.getfpv.com/learn/fpv-diy-repairs-and-mods/designing-first-fpv-drone-frame>
- [17] DRONE NODES. How to Build A Drone: Step by Step Guide. In: Getfpv.com [online]. ©2015-2021 [cit. 2021-2-3]. Dostupné z: <https://dronenodes.com/how-to-build-a-drone>
- [18] ANON, Alex. The Complete Guide to Buying an FPV Quadcopter Frame. In: Blog.dronetrest.com [online]. October 27, 2017 [cit. 2021-2-3]. Dostupné z: <https://blog.dronetrest.com/fpv-quadcopter-frame-buying-guide>
- [19] SHEN, C. Huang, F. Y. C. ALBERT, C. K. ANG, Dwee Jin TECK a K. P. CHAN, 2017. Theoretical development and study of takeoff constraint thrust equation for a drone. 2017 IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCOREd) [online]. IEEE, 2017, 18-22 [cit. 2021-2-11]. ISBN 978-1-5386-2126-4. Dostupné z: doi:10.1109/SCORED.2017.8305428
- [20] JUST DRONES, 2017. How Much Power Is Needed To Hover ? In: Justdrones.com [online]. © 2014 - 2021 [cit. 2021-2-11]. Dostupné z: <https://justdrones.com.au/how-much-power-is-needed-to-hover>
- [21] MAŠKOVÁ, Olga, 2000. Fyzikální praktikum. 4. vyd.-upr. Plzeň: Západočeská univerzita, 248 s. ISBN 80-708-2653-3.

- [22] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Setrvačná odstředivá síla. In: Fyzika.jreichl.com [online]. © 2006 - 2021 [cit. 2021-2-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/42-setrvacna-odstrediva-sila>
- [23] Kyvadlo na kolotoči. In: Sběrka řešených úloh [online]. 18. 7. 2019 [cit. 2021-2-16]. Dostupné z: <http://reseneulohy.cz/481/kyvadlo-na-kolotoci>
- [24] SHAQURA, Mohammad a Jeff S. SHAMMA, 2017. An Automated Quadcopter CAD based Design and Modeling Platform using Solidworks API and Smart Dynamic Assembly. In: Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics [online]. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2017, s. 122-131 [cit. 2021-2-16]. ISBN 978-989-758-263-9. Dostupné z: [doi:10.5220/0006438601220131](https://doi.org/10.5220/0006438601220131)
- [25] GHEORGHITA, Daniel, Ionut VINTU, Letitia MIREA a Catalin BRAESCU, 2015. Quadcopter control system. In: 2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC) [online]. IEEE, 2015, s. 421-426 [cit. 2021-2-16]. ISBN 978-1-4799-8481-7. Dostupné z: [doi:10.1109/ICSTCC.2015.7321330](https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2015.7321330)
- [26] NEMATI, A., M. KUMAR, Letitia MIREA a Catalin BRAESCU, 2014. Modeling and control of a single axis tilting quadcopter. In: 2014 American Control Conference [online]. IEEE, 2014, s. 3077-3082 [cit. 2021-2-17]. ISBN 978-1-4799-3274-0. Dostupné z: [doi:10.1109/ACC.2014.6859328](https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6859328)
- [27] LUPASHIN, Sergei, Angela SCHÖLLIG, Michael SHERBACK a Raffaello D'ANDREA, 2010. A simple learning strategy for high-speed quadcopter multi-flips. In: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation [online]. IEEE, 2010, s. 1642-1648 [cit. 2021-2-17]. ISBN 978-1-4244-5038-1. Dostupné z: [doi:10.1109/ROBOT.2010.5509452](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509452)
- [28] Musa, Sumaila, 2018. Techniques for Quadcopter Modelling & Design: A Review. In: Journal of Unmanned System Technology [online]. May 2018, [cit. 2021-2-20]. ISSN 2287-7320. Dostupné z: [10.21535/just.v5i3.981](https://www.researchgate.net/publication/325154355_Techniques_for_Quadcopter_Modelling_Design_A_Review). Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/325154355_Techniques_for_Quadcopter_Modelling_Design_A_Review
- [29] SHEN, C. Huang, F. Y. C. ALBERT, C. K. ANG, Dwee Jin TECK a K. P. CHAN, 2017. Theoretical development and study of takeoff constraint thrust equation for a drone. In: 2017 IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCOREd) [online]. IEEE, 2017, s. 18-22 [cit. 2021-2-20]. ISBN 978-1-5386-2126-4. ISSN 2287-7320. Dostupné z: [doi:10.1109/SCORED.2017.8305428](https://doi.org/10.1109/SCORED.2017.8305428)

- [30] HARRELL, Ryan. Motor Data Explorer. In: Miniquadtestbench.com [online]. © 2015 [cit. 2021-2-24]. Dostupné z: https://www.miniquadtestbench.com/motor-explorer.html?fbclid=IwAR0Yxz9AQe0mMieea-NS4jQLCzveRU_pqiPgWGaspdREiT6bRTvzn_bMpG8
- [31] SORENSON, Josh. In: Pexels.com [online]. 23. 4. 2018 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.pexels.com/cs-cz/foto/obloha-letani-mraky-technologie-1034812>
- [32] ANTUNES, Jose. In: Provideocoalition.com [online]. May 31, 2015 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: https://www.provideocoalition.com/new-drone-uses-combustion-engine/?fbclid=IwAR1DpZVSD12Ya_XRo5PO5WsmijLhgJtAsdCtgjC8cdiJtYEOwigj0uvikbg
- [33] THORBURN, Callum. Drone Build Tips and Tricks – Part One. In: Getfpv.com [online]. ©2018, March 27, 2018 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.getfpv.com/learn/fpv-essentials/fpv-drone-build-tips-tricks-part-one>
- [34] MADDOX, Phil. DALPROP T5046C Cyclone. In: Grabcad.com [online]. © 2021, November 9th, 2018 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/dalprop-t5046c-cyclone-1?fbclid=IwAR2iJRhjhshgYXLtwojQ5C1vBnCbXrLCFGldusdIc1PneeVQdT-qgxFpHFBg>
- [35] FOM, Nik. Eachine TX805 v2.0. In: Grabcad.com [online]. © 2021, July 27th, 2020 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: https://grabcad.com/library/eachine-tx805-v2-0-1?fbclid=IwAR1gb25QX_a2oWJGH1HO3eJHvHzH8kG1nnjF59MmZpcJuwvPGcNaA5K2V9Q
- [36] FLIR SYSTEMS. Black Hornet PRS: MEDIA GALLERY. In: Flir.eu [online]. © 2020 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: https://www.flir.eu/products/black-hornet-prs/?fbclid=IwAR02V1D4ol8a1WvafBU4Qhux4qpw3y8JUBP4U1aBw__W9aUI4G_7BEZAGXg
- [37] NARDI, Tom. 3D PRINTING A BETTER QUADCOPTER FRAME. In: Hackaday.com [online]. © 2021, January 15, 2018 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2018/01/15/3d-printing-a-better-quadcopter-frame/?fbclid=IwAR1jAanzQK7CifZozBrabf6lTfeZEOWpTR25RO6tMA-8YYmwpumIQtbZdtY>
- [38] TAHITI, Andrier. How to Design and 3D Print Your Very Own Quadcopter !! In: Nstructables.com [online]. © 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/How-to-Design-and-3D-Print-Your-Very-Own-Quadcopte/?fbclid=IwAR0S0fV-nZ-eijNuA3VApmxCsIlzNW5Vrma4wRcsJQsl3B1BGsFsjIf6Sps>

- [39] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. Strojnické tabulky 1: Pro školu a praxi. 1. vydání Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-7183-312-6.
- [40] KARAS, Jakub a TICHÝ Tomáš. Drony. 1. vydání Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4680-4.
- [41] JOHNSON, Sam. A Beginner's Guide to FPV. In: Blog.dronetrest.com [online]. April 28, 2018 [cit. 2021-1-24]. Dostupné z: <https://blog.dronetrest.com/beginners-guide-to-fpv>
- [42] SMITH, M. Brett, 2021. What Is an FPV Drone? In: Bhphotovideo.com [online]. B & H Foto & Electronics, © 2000-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://www.bhphotovideo.com/explora/video/features/what-is-an-fpv-drone?fbclid=IwAR2Am_tWvJGk8IIB5eqQfdau6AF-WfoOqXSi48kktYBIDw7Gwre6SGMY-aA
- [43] First-person view (radio control), 2001. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 22 January 2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/First-person_view_\(radio_control\)?fbclid=IwAR2UYIp8g9TfsGR2xoEzP_ih5nkh4Oox9iWneku7nLwrvaaO3z0YBGvGoxk](https://en.wikipedia.org/wiki/First-person_view_(radio_control)?fbclid=IwAR2UYIp8g9TfsGR2xoEzP_ih5nkh4Oox9iWneku7nLwrvaaO3z0YBGvGoxk)
- [44] Getfpv.com [online], © 2021. Sarasota: GetFPV [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.getfpv.com>
- [45] FARAH, Shady, Daniel G. ANDERSON a Robert LANGER, 2016. Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications — A Comprehensive Review. In: Advanced Drug Delivery Reviews [online]. Elsevier, 15 Dec 2016, s. 367-392 [cit. 2021-5-30]. ISSN 0169-409X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169409X16302058?via%3Dihub>

15 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Ilustrační obrázek prvních bezpilotních letadel	9
Obrázek 2 – Bepilotní letoun nazývaný vzdušné torpédo	9
Obrázek 3 – Letoun bratrů Bréguetů	10
Obrázek 4 – Armádní bezpilotní letoun MQ-1 Predator	11
Obrázek 5 – Vojenský bezpilotní letoun jménem černá sršň.....	12
Obrázek 6 – Obrazovka průzkumných bezpilotních letounů	12
Obrázek 7 – Kvadrokoptéra se spalovacím motorem.....	13
Obrázek 8 – Kvadrokoptéra.....	13
Obrázek 9 – Dron s více rotory	14
Obrázek 10 – Dron s pevnými křídly	14
Obrázek 11 – Dron s jedním rotorem	15
Obrázek 12 – Hybridní dron s pevnými křídly.....	16
Obrázek 13 – Multikoptéra používaná v zemědělském průmyslu	17
Obrázek 14 – Záchranářský dron.....	17
Obrázek 15 – FPV dron	17
Obrázek 16 – Rám do „Z“	18
Obrázek 17 – Rám do „H“	18
Obrázek 18 – Rám do „X“	18
Obrázek 19 – Rámy dronů.....	18
Obrázek 20 – Podvozek multikoptéry	19
Obrázek 21 – Vrtule kvadrokoptér	19
Obrázek 22 – Nosné rameno FPV dronů.....	20
Obrázek 23 – Motor FPV dronů	20
Obrázek 24 – Elektronický regulátor otáček FPV dronů	21
Obrázek 25 – Řídící jednotka letu FPV dronů	21
Obrázek 26 – Rozvodná deska FPV dronů.....	22
Obrázek 27 – Baterie	22
Obrázek 28 – Dálkový ovladač s gimbaly.....	23
Obrázek 29 – Video vysílač FPV dronů.....	23
Obrázek 30 – Blokové schéma zapojení.....	25
Obrázek 31 – Detailní schéma zapojení	25
Obrázek 32 – Princip letu kvadrokoptéry.....	27
Obrázek 33 – Proudění vzduchu na list vrtule.....	28
Obrázek 34 – Schéma momentů a tahových sil kvadrokoptéry	31
Obrázek 35 – Horní rám 3D	34
Obrázek 36 – Horní rám 2D	34
Obrázek 37 – Spodní rám 3D	34
Obrázek 38 – Spodní rám 2D	34
Obrázek 39 – Nosné rameno 3D	35
Obrázek 40 – Nosné rameno 2D	35
Obrázek 41 – Styčnick 3D	35
Obrázek 42 – Styčnick 2D	35
Obrázek 43 – Stojan hlavní kamery 3D.....	36
Obrázek 44 – Stojan hlavní kamery 2D.....	36
Obrázek 45 – Rám pro FPV kameru 3D	36

Obrázek 46 – Kryt hlavní kamery 3D	37
Obrázek 47 – Zadní kryt 3D	37
Obrázek 48 – Konstrukční sestavení součástí	38
Obrázek 49 – Konstrukční sestava FPV dronu.....	39
Obrázek 50 – Koncept FPV dronu	39
Obrázek 51 – Zjednodušený model dron s vytvořenou sítí.....	40
Obrázek 52 – Nosné rameno s motorem pro MKP	40
Obrázek 53 – Zjednodušený model dronu pro MKP.....	40
Obrázek 54 – Nosné rameno a motor s vytvořenou sítí	40
Obrázek 55 – Pole napětí HMH (S, mises) pohled shora.....	41
Obrázek 56 – Pole napětí HMH (S, mises) pohled zdola.....	41
Obrázek 57 – Pole napětí HMH (S, mises) pohled shora na šrouby	42
Obrázek 58 – Pole napětí HMH (S, mises) pohled shora.....	41
Obrázek 59 – Pole napětí HMH (S, mises) pohled zdola.....	42
Obrázek 60 – Pole posuvů (U, magnitude) pohled shora	42
Obrázek 61 – Pole napětí HMH (S, mises) pohled shora na šrouby	42

16 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Elektronické součásti	24
Tabulka 2 - Rozměrové velikosti elektr. součástek	26
Tabulka 3 - Výpočtové parametry	29
Tabulka 4 - Materiálové vlastnosti	40

17 Seznam grafů

Graf 1 – Tahová charakteristika motoru	30
--	----

18 Seznam příloh

Příloha 1 – Výkres sestavy konstrukce FPV dronu

Příloha 2 – Výkres sestavy FPV dronu

Příloha 3 – Kusovník pro výkres sestavy FPV dron

19 Seznam zkratek a symbolů

FPV		First person view = pohled z první osoby
GPS		Globální polohovací systém
UAV		Unmanned aerial vehicle = bezpilotní letadlo
PBD		Power distribution board = rozvodná deska
ESC		Electronic speed controllers = elektronické regulátory otáček
FCS		Flight control systém = řídicí jednotka letu
TPU		Termoplastický polyuretan
PLA		Polyaktidová vlákna
T	[N]	Tahová síla
ρ	[kg/m ³]	Hustota vzduchu
A	[m ²]	Plocha rotoru vrtule
v	[m/s]	Rychlost vzduchu na vrtuli
Δv	[m/s ²]	Rychlost vzduchu zrychlenou vrtulí
\dot{m}	[kg/s]	Hmotnostní průtok
R	[m]	Poloměr vrtule
P	[W]	Výkon motoru
n	[ot/min]	Otáčky motoru
m	[kg]	Hmotnost kvadrokoptéry
a	[m/s ²]	Zrychlení kvadrokoptéry
F	[N]	Vektor tahových sil
F_{Tc}	[N]	Výslednice tahových sil
G	[N]	Tíhová síla
g	[m/s ²]	Tíhové zrychlení
F_V	[N]	Výsledná tahová síla
l	[mm]	Délka nosného ramena
$M(x)$	[N/mm]	Moment podél osy x
$M(y)$	[N/mm]	Moment podél osy y

$M(z)$	$[N/mm]$	Moment podél osy z
M	$[N/mm]$	Vnější silový účinek
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	Úhlová rychlost
ε	$[rad \cdot s^{-2}]$	Úhlové zrychlení
I	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti
m_i	$[kg]$	Hmotnost i-tého hmotného bodu
r_i	$[m]$	Kolmá vzdálenost hmotného bodu od osy otáčení
t	$[s]$	Celkový čas při rotaci
R_m	$[MPa]$	Pevnost v tahu
R_e	$[MPa]$	Mez kluzu
E	$[MPa]$	Yongův modul pružnosti
μ	$[-]$	Poissonovo číslo