



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav letadlové techniky**

**Návrh kvadrokoptéry vyráběné 3D tiskem**

**Development of 3D-printed quadrocopter**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2020**

**Jaroslav HANYŠ**

**Studijní program:** B2341 STROJÍRENSTVÍ

**Studijní obor:** 3901R051 KONSTRUOVÁNÍ PODPOROVANÉ POČÍTAČEM

**Vedoucí práce:** Ing. Jan KLESA, Ph.D

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hanyš** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **437285**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh kvadroptéry vyráběné 3D tiskem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Development of 3D-printed quadcopter**

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Rešerši současného stavu
- 2) Popis stávající konstrukce
- 3) Princip letu kvadroptéry
- 4) Popis technologie 3D tisku
- 5) Návrh nového konstrukčního řešení

Seznam doporučené literatury:

Literatura a podklady dle pokynů vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Klesa, Ph.D., ústav letadlové techniky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Jan Klesa, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Ing. Robert Theiner, 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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh kvadrokoptéry vyráběné 3D tiskem vypracoval“ samostatně pod vedením Ing. Jan Klesa, Ph.D, s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze

Jaroslav Hanyš

## **Poděkování**

Rád bych na tomto místě poděkoval mému vedoucímu panu Ing. Janu Klesovi, Ph.D za pomoc při vedení mé bakalářské práce, za připomínky, pomoc, cenné rady a trpělivosti při vypracování. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a umožnění studia na vysoké škole. Chtěl bych poděkovat i mé přítelkyni za pomoc a trpělivosti při psaní bakalářské práce.

## Anotační list

Jméno autora:	Jaroslav HANYŠ
Název BP:	Návrh kvadrokoptéry vyráběné 3D tiskem vypracoval
Anglický název:	Development of 3D-printed quadrocopter
Rok:	2020
Studijní program:	B2341 Strojírenství
Obor studia:	3901R051 konstruování podporované počítačem
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Jan Klesa, Ph.D
Konzultant:	Ing. Jan Klesa, Ph.D
Bibliografické údaje:počet stran	42
počet obrázků	33
počet tabulek	3
počet příloh	6
Klíčová slova:	Kvadrokoptéra, Dron, 3D tisk
Keywords:	Quadcopter, Drone, 3D printing
Anotace:	

Cílem této bakalářské práce je navrhnout nové konstrukční řešení kvadrokoptéry vyráběné 3D tiskem. Nejprve se práce zabývá různými typy (velikostmi) kvadrokoptér, konstrukčními uspořádáními a popisem původní konstrukce. Dále popisuje princip letu kvadrokoptéry, pohyb v jednotlivých osách a dynamiku pohybu se základními výpočty vztahujícími se k počáteční konstrukci. Poté následuje popis jednotlivých technologií 3D tisku a zvolenou aditivní technologie Termoplastického vytlačování - metoda FFF - Fused Filament Fabrication, která byla použita pro původní konstrukční řešení a základní materiály používané pro tuto metodu. Následuje návrh úprav konstrukce a doporučené další úpravy. Práce je ukončena zhodnocením a porovnáním původní a nové konstrukce kvadrokoptéry.

### Abstract:

The aim of this Bachelor's Thesis is to design a new design solution for a quadcopter produced by 3D printing. The Thesis describes different types (sizes) of quadcopters, structural arrangements and a description of the original structure. It also explains basic theory of quadcopter motion in individual axes and motion dynamics with basic calculations. The Thesis describe 3D printing technologies and the selected additive technology of Thermoplastic Extrusion - FFF method - Fused Filament Fabrication and the basic materials used for this method. The following is a proposal for structural modifications and recommended further modifications. The work is completed by evaluating and comparing the original and new design of the quadcopter.

# Obsah

Prohlášení.....	- 3 -
Poděkování.....	- 4 -
Anotační list.....	- 5 -
Obsah .....	- 6 -
1 Úvod .....	1
2 Rešerše .....	2
2.1 Miniaturní kvadrokoptéry do 150 mm .....	3
2.2 Kvadrokoptéry do 250mm .....	6
2.3 Kvadrokoptéry do 500mm a větší.....	8
3 Popis stávající konstrukce .....	13
3.1 Sběr dat a výběr komponentů .....	13
3.2 Konstrukce .....	14
3.2.1 Obecná charakteristika .....	14
3.2.2 Středové desky .....	16
3.2.3 Ramena.....	16
3.2.4 Podvozkové nohy a lyže .....	18
3.2.5 Souhrn .....	18
4 Princip letu kvadrokoptéry.....	21
4.1 Dynamika pohybu .....	22
4.2 Posuvný pohyb v ose Z – stoupání a klesání.....	23
4.3 Posuvný pohyb v osách X a Y – let dopředu a do boku .....	24
4.4 Otáčení kolem osy X a Y.....	24
4.5 Otáčení kolem osy Z.....	26
5 Výpočty.....	27
6 Popis technologie 3D tisku .....	28
6.1 Technologie a principy 3D tisku .....	28
6.1.1 Princip 1 - Stereolitografie (SLA) .....	29
6.1.2 Princip 2 - Selektivní laserové spékání (SLS) .....	29
6.1.3 Princip 3 - Laminated Object Manufacturing (LOM).....	30
6.1.4 Princip 4 - Termoplastické vytlačování (FFF).....	30
6.2 Materiály pro 3D tisk metodou FFF .....	31

6.2.1	Materiál PLA .....	31
6.2.2	Materiál ABS.....	32
6.2.3	Materiál PET/PETG .....	32
7	Návrh nového konstrukčního řešení .....	35
7.1	Změny v elektroinstalaci .....	35
7.2	Změna rozměrů konstrukce .....	35
7.2.1	Změna ramen .....	35
7.2.2	Zmenšení podvozkových nohou.....	36
7.2.3	Změna základních desek .....	37
7.3	Změna materiálu .....	37
8	Závěr .....	38
9	Seznam literatury .....	39
10	Seznam obrázků .....	41
11	Seznam tabulek .....	41
12	Seznam příloh .....	42



# **1 Úvod**

Projekt kvadrokoptéra vznikl na Podolské koleji v únoru 2018 v rámci Klubu Pod-O-Lee, Studentské unie ČVUT v Praze. Základem projektu bylo vyzkoušení si navrhnout a zkonstruovat kvadrokoptéru, naučit se se softwarem a hardwarem v rámci Pod-O-Lab. Cílem bylo vytvoření letuschopné kvadrokoptéry nesoucí užitečné zatížení v podobě videokamery GoPro k natáčení venkovních akcí pořádané Klubem. Vytvořený tým měl navrhnout takovou konstrukci, která bude vytištěna na kolejní 3D tiskárně, odolnou proti poškození a zároveň bezpečnou při ztrátě kontroly.

Tým se rozdělil na jednotlivé skupiny s různým zaměřením. První skupina se věnovala výběru veškeré elektroinstalace, tedy výběr elektromotorů, regulátorů, akumulátoru, řízení. Druhá skupina se zaměřila na programování stabilizace letu. Třetí skupina se zaměřila na vývoj konstrukce a možnostech 3D tisku.



## 2 Rešerše

Tato část obsahuje rešerši existujících možných konstrukčních řešení kvadrokoptéry vyráběné 3D tiskem. Hlavním dělením je velikost rámu. Ta je měřena od středu předního levého (nebo pravého) motoru do středu zadního motoru na opačné straně konstrukce. Velikost kvadrokoptéry může činit od miniaturních rozměrů až po obrovské kvadrokoptéry. S přibývajícím velikostí často dochází i ke zvýšení počtu rotorů na 6 (hexakoptéry) nebo 8 (oktakoptéry) - těmi se zde zabývat nebudeme.

Jak by měla vypadat kvadrokoptéra? Zde je možné nechat volnou ruku fantazii. Každý návrh bude fungovat, za předpokladu dodržení několika základních pravidel. Konstrukce tedy můžeme rozdělit dle jejich velikosti a zároveň celistvosti konstrukce. Lze tedy vytvořit malou kvadrokoptéru celou z jednoho kusu (například XL-RCM 10.0 PIXXY nebo Micro 105 FPV Quadcopter). Druhým řešením, u většiny větších a velkých kvadrokoptér, je rám tvořený ze dvou oddělených desek se sloupky od 15 mm do 35 mm. Spodní deska obvykle slouží pro namontování veškeré elektroniky a horní deska slouží jako víko (pro uzavření všeho). Ramena lze namontovat jak na horní tak i spodní desku. Existují konstrukce, které místo sloupků mají ramena o dané výšce přimontované přímo mezi spodní a horní desku.

Obě konstrukce mají své výhody i nevýhody. Výhodou celistvé konstrukce je jednoduchost a celý rám se vleze na tiskovou podložku, omezením je pouze velikost 3D tiskárny. Vše je pevně spojeno díky technologii tisku, nic není potřeba k sobě sešroubovat, vyjma horního krytu. Ten však lze navrhnout na přilepení, přicvaknutí, nebo nasazení. Nevýhodou této koncepce je poškození. Při jakémkoliv porušení konstrukce bude potřeba tisknout celý rám znovu.



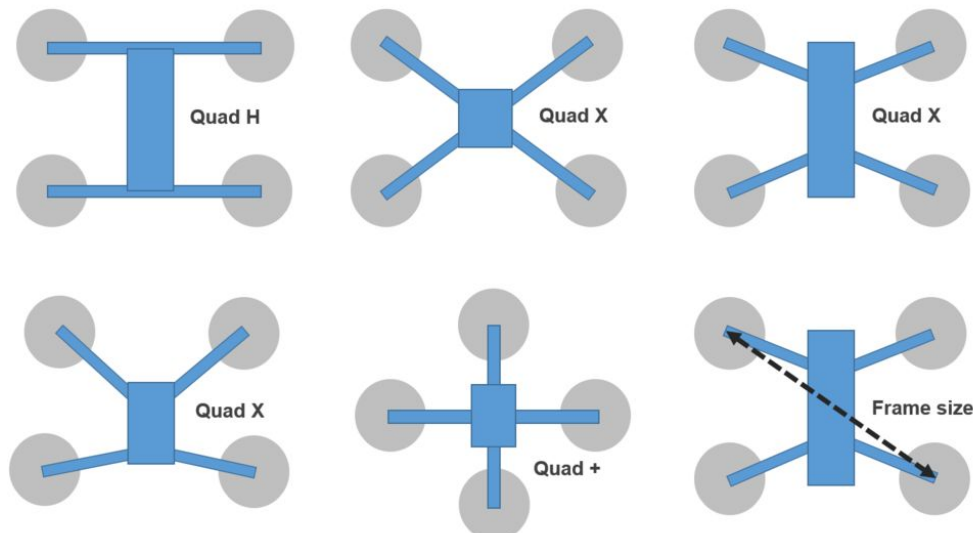
**Obrázek 1: Příklad miniaturní kvadrokoptéry - Super Light Quadcopter**

Zdroj: <https://www.instructables.com/id/Super-Light-Quadcopter/>

Koncepce dvou základních desek nám přináší větší variabilitu konstrukcí a to ať už jak velikostí, tak i různých tvarů. Další výhodou této koncepce přináší při porušení, kdy zničený díl bude jednoduše vytisknut znovu. Nevýhodou této konstrukce je, že se musí počítat se spojovacím materiálem a tím pádem je potřeba počítat s určitým prostorem a

taky pevnostními prvky. Dále je potřeba si uvědomit, že tisk takového rámu zabere více času než celistvé konstrukce, avšak pokud se zvolí taková velikost dílů, že se více prvků rozprostře na tiskovou podložku, tiskový čas se zkrátí.

Základní kvadrokoptéry mají motory na stejné úrovni (v jedné rovině) a celkově vytvářejí jeden ze 3 základních tvarů: H nebo X nebo +.



**Obrázek 2: Základní uspořádání konstrukce**

Zdroj: <https://www.instructables.com/id/How-to-Design-and-3D-Print-Your-Very-Own-Quadcopter/>

## 2.1 Miniaturní kvadrokoptéry do 150 mm

Velké zastoupení na poli tištěných kvadrokoptér mají miniaturní kvadrokoptéry, které svojí velikostí odpovídají velikosti lidské dlaně. Mezi jejich obrovskou výhodou patří jejich skladnost, a tím tedy i jejich jednoduchý transport. Další výhodou, kterou uvítá mnoho zájemců, jsou nízké pořizovací náklady. Avšak naproti tomu je zapotřebí dávka šikovnosti a zručnosti pro spojování a pájení elektronických prvků.

Jedním takovým zástupcem této velikosti je XL-RCM 10.0 PIXXY: Pocket Drone / FPV quad. Jak název napovídá, jedná se o velmi malou kapesní (=pocket) kvadrokoptéru řízenou technologií FPV (= First Person View), tj. řízení z pohledu dronu. Toto řízení můžeme najít u většiny zástupců této velikosti, které představuje úplně jiný druh zážitku, než pouhé pozorování stroje ze země. Zážitek z létání je pak samozřejmě lepší, ale nejen to, řízení z pohledu pilota je také mnohem pohodlnější a bezpečnější.



**Obrázek 3: XL-RCM 10.0 PIXXY**

Zdroj:

[https://www.pinterest.co.kr/pin/424534702353346048/?amp\\_client\\_id=CLIENT\\_ID\(&mweb\\_unauth\\_id=%7B%7Bdefault.session%7D%7D&from\\_amp\\_pin\\_page=true](https://www.pinterest.co.kr/pin/424534702353346048/?amp_client_id=CLIENT_ID(&mweb_unauth_id=%7B%7Bdefault.session%7D%7D&from_amp_pin_page=true)

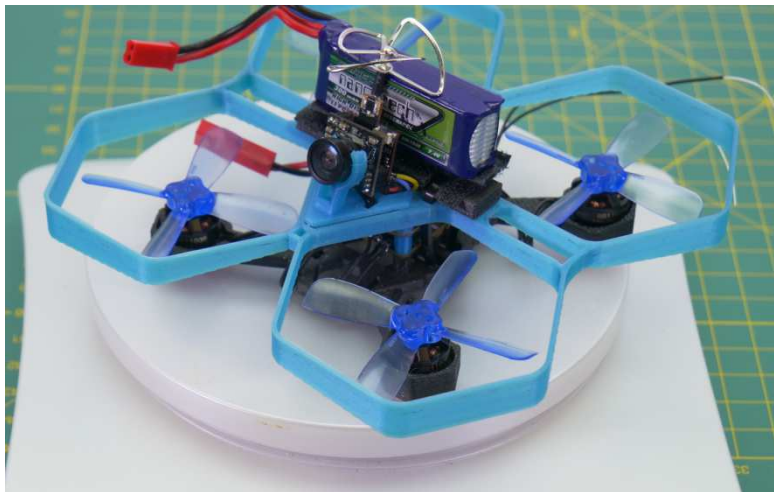
Dalším zástupcem v této velikosti je Micro 105 FPV Quadcopter. Tato konstrukce se od předchozí liší pouze tvarem základní desky avšak má stejnou koncepci do X.



**Obrázek 4: Micro 105 FPV Qaudcopter**

Zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:1221911>

Velmi oblíbená, malá a levná kvadrokoptéra je MINI DRONE navržený panem Josefem Průšou. Tato kvadrokoptéra má konstrukci celistvého rámu, velikost rámu je 90mm a hmotnost celého dronu nepřesahuje 80g.



**Obrázek 5: MINI DRONE**

Zdroj: [https://blog.prusaprinters.org/how-to-build-a-3d-printed-micro-drone\\_29310/](https://blog.prusaprinters.org/how-to-build-a-3d-printed-micro-drone_29310/)

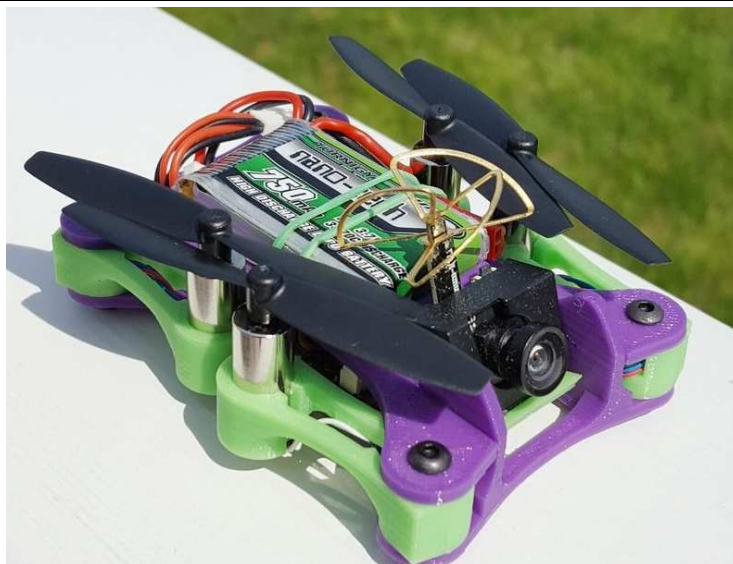


**Obrázek 6: Foldable Brushed Microquad - rozložený stav**

Zdroj: <https://www.thingiverse.com/make:236336>

Je potřeba zmínit, že i v této nejmenší velikosti nalezneme konstrukci dvou základních desek a ramen. Takovým příkladem je Foldable Brushed Microquad. Tato kvadrokoptéra má ve složeném stavu rozměry 83x58 mm a v rozloženém stavu činí rozpětí 138 mm. Nelze od toho, celkem těžkého "drobečka" na svoji velikost, očekávat nějaké akrobatické prvky, avšak tak zaujme svojí konstrukcí. Ramena mají štěrbinu pro pohledné, hladké a čistě zapojení a zabraňují tak náhodnému poškozování kabelů od motorů při skládání ramen.





**Obrázek 7: Foldable Brushed Microquad - složený stav**

Zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:1604440>

Tyto kvadroptéry jsou vhodné a skvělé pro létání na malých místech a hlavně pro létání uvnitř, kde si s nimi člověk užije nejvíc zábavy.

## 2.2 Kvadroptéry do 250mm

Velikost kvadroptéry 200mm a 250mm vyrobené 3D tiskem jsou velmi oblíbené pro závodní drony. I tyto jsou převážně ovládané FPV. Konstrukce do 200 mm jsou nejčastější velikostí pro freestylové drony, protože jsou menší a lehčí. Rám velikosti 250 mm dává velký kompromis mezi malou velikostí rámu a použitím větších motorů.

Příkladem takovéto konstrukce je Hovership MHQ2. Rám má tvar H, je tvořený koncepcí dílů, tedy základem jsou dvě základní desky a ramena. Konstrukce této kvadroptéry dále umožňuje jednoduchý transport díky možnosti sklopení ramen k základním deskám.



**Obrázek 8: Hovership MHQ2 - rozložený stav**

Zdroj: <https://cults3d.com/en/3d-model/game/hovership-mhq2>



**Obrázek 9: Hovership MHQ2 - složený stav**

Zdroj: <https://cults3d.com/en/3d-model/game/hovership-mhq2>

Dalším příkladem s podobnou konstrukcí je kvadrokoptéra s názvem **THE FIREFLY**. Tento krásný 3D vytištěný dron může létat opravdu rychle. Jedná se o plně vybaveného závodního zástupce této velikosti s výbornými letovými vlastnostmi. V případě, že se zajímáte o závodní kvadrokoptéry pro kutily, tak tento kousek je nutné vzít v úvahu.

Je také třeba zmínit, že tato kvadrokoptéra nevyužívá jen samotný 3D tisk, ramena jsou tvořena uhlíkovými trubkami.



**Obrázek 10: THE FIREFLY**

Zdroj: <http://firefly1504.com/index.html>

## 2.3 Kvadrokoptéry do 500mm a větší

Tato kategorie má asi největší zastoupení. Ať už se jedná o vlastní projekty tak i komerční účely. Velikost takovéto konstrukce a 3D tisk jsou perfektní kombinací. Výhody této velikosti stále více přitahují řadu odvětví, protože umožňují dostat se do oblastí nepřístupných pro člověka. Tradiční dron může být velmi drahý, pokud je potřeba kvalitní zařízení. Může se stát, že zvolená kvadrokoptéra není zcela přizpůsobena vašemu projektu a nemá všechny funkce, které potřebujete. Nebo naopak, robot může mít příliš mnoho funkcí a nebudete je používat všechny. Průmysl 3D tisku umožňuje vytvořit si vlastní dron, a tím si přizpůsobit konstrukci a funkce podle vašich potřeb. Vývoj takové kvadrokoptéry je levnější a rychlejší oproti produktům na trhu. Je možné vytvořit opravdu lehké konstrukce, malé i větší, mnohdy i rychlejší.

Příkladem těchto konstrukcí je X-vein - 3D tištěný dron pro záchranu životů při katastrofách. Tato kvadrokoptéra je podle návrhu Yuki Ogasawary a Ryo Kumedy. Myšlenka projektu se objevila po zemětřesení, které se dotklo Japonska v roce 2011. Cílem tohoto dronu bylo létat v nebezpečných zónách, aby našli přeživší po katastrofě.



**Obrázek 11: X-vein drone**

Zdroj: <https://3dprint.com/181435/generative-design-x-vein-drone/>

3D tisk jim umožnil vytvořit model, který by mohli přizpůsobit svému projektu. Má ideální velikost a hmotnost pro tyto druhy podmínek. Jak je z fotografie patrné, rám je zesílený a také získal prodlouženou dobu letu. Dalším vylepšením je schopen nést termografické a infračervené vybavení, což může být užitečné při hledání lidí. Tyto drony mají výhodu, že do postižených a nebezpečných oblastí není nutné posílat pátrací vrtulník, ale vyšle se letka dronů, které prozkoumají větší oblast, a poté se do patřičné oblasti vyšle záchranný tým.

Dalším zástupcem této kategorie je CargoCopter 3D. Jedná se o tištěnou kvadrokoptéru, která by mohla být budoucností dodávání zboží. Dodací služby jsou stále více vyhledávány. V posledních letech byla řeč o doručovacích službách, které by mohly v budoucnu používat drony. Toto se pomalu začíná stávat realitou ve světě, také je to cíl CargoCoptera plně vytištěného technologií 3D tisku. Tato kvadrokoptéra dokáže přepravit náklad o hmotnosti až 5 kg a dosáhnout rychlosti 150 km / h. Jde o účinný dron, jehož cílem je dodávat zboží na velkou vzdálenost.



**Obrázek 12: CargoCopter 3D**

Zdroj: <http://cargocopter.be/media.html>

3D tisk umožňuje vědcům KU Leuven provádět rychlé prototypování, takže je možné upravovat design kvadrokoptéry a vytvořit finální podobu CargoCoptera. Tento projekt může být budoucím způsobem dodávání zboží.

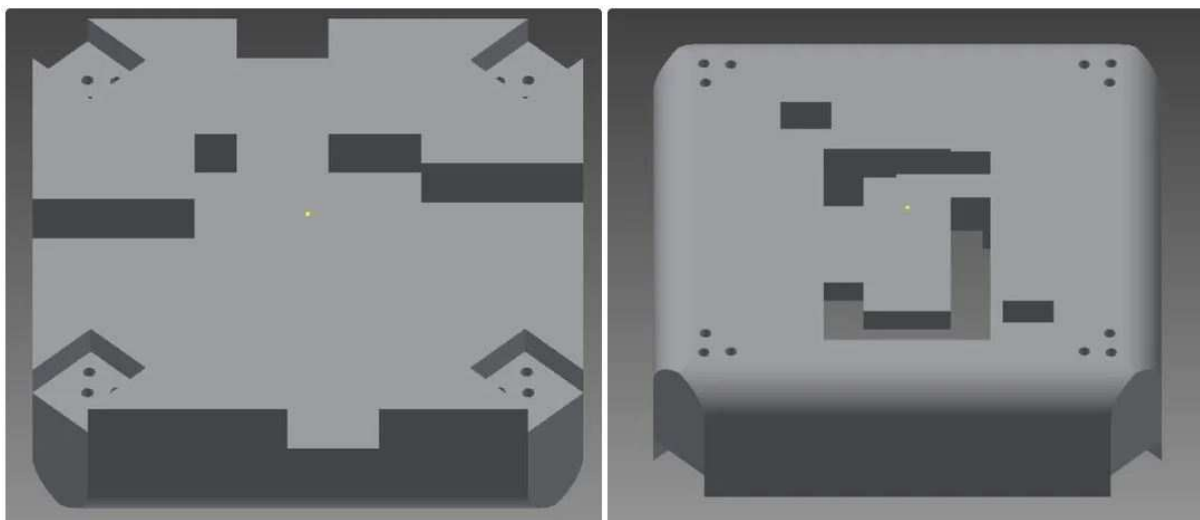
Ač to tak nevypadá tak i následující kvadrokoptéra patří svojí velikostí do této kategorie. Nemá žádný specifický název, ale nalezneme ji jako: 3D Printed Quadcopter With Arduino. Zvláštní na ní je, že je opravdu "po domácku" vyrobená, a proto její vzhled ne každého zaujme. Pro první pokusy jde však o dobrou inspiraci a člověk má mnoho možností se něco naučit. Na této konstrukci je zajímavé, že střed rámu tvoří dvě poloviny krabičky chránící elektroniku.





**Obrázek 14: 3D Printed Quadcopter With Arduino**

Zdroj: <https://www.instructables.com/id/3D-Printed-Quadcopter-with-Arduino/>



**Obrázek 13: Model krabičky 3D Printed Quadcopter With Arduino**

Zdroj: <https://www.instructables.com/id/3D-Printed-Quadcopter-with-Arduino/>

Je zvláštní, že u nejmenších kvadrokoptér se dost často setkáváme se sklopnými rameny, které jsou i tak skladné, zatímco u velkých dronů je většina konstrukcí pevných. Pravděpodobně je to z důvodu celkové tuhosti rámu. Avšak nalezneme zde alespoň jednoho zástupce se sklopnými rameny - Foldable drone frame (volně přeloženo Skládací dronový rám). Tato kvadrokoptéra je inspirována DJI Mavic dronem navrženým Johnem Plunkettem, který jej remixoval a sdílel. Díky tomu byl vytvořen tisknutelný 3D model Skládací kvadrokoptéry.

Rám je opět tvořen středovým základem, ten se skládá z několika částí zajišťující dostatečný prostor pro elektroniku, zámek ramen, a celkový tvar připomíná tvar závodního automobilu nebo nějaké sci-fi vznášedlo (například z Hvězdných válek).

Velmi zajímavý je princip skládání ramen. Je zde využito pružinového mechanismu pro zajištění polohy předních i zadních ramen. Tento způsob je velmi jednoduchý, účinný a použitelný pro 3D tisk. Navzdory tomu tato koncepce nedodržuje jedno ze základních pravidel - všechny motory nejsou v jedné rovině. Přední rotory jsou v jiné výšce, jsou více než zadní rotory. Na konstrukci to nemá vliv, ale pro řízení a stabilizaci to hraje velký význam.



**Obrázek 15: Foldable drone frame - DJI Mavic 3D tisk, rozložený stav**

Zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:2004357>



**Obrázek 16: Foldable drone frame - DJI Mavic 3D tisk, složený tvar**

Zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:1940102>

Za zmínku stojí ještě jedna kvadrokoptéra, jedná se o napodobeninu originální DJI F450., ale jako tisknutelný model. Některé díly jsou předělánkou existujících dílů s osobními úpravami a vylepšeními s originálním designem. Oproti originálu je konstrukce flexibilnější a lehčí, hmotnost celého osazeného dronu činí okolo 1000 g.

Tisknutelná 3D kvadrokoptéra v tomto případě umožňuje volitelné díly jako jsou podvozkové nohy. Jsou doporučené, protože slouží k tlumení tvrdého přistání. Navíc je zde možnost si vybrat hned ze 3 velikostí. Krátké nohy jsou vhodné v případě, že pod spodní deskou není nic dalšího nainstalováno. Střední velikost slouží v případě, kdy je akumulátor namontován pod spodní desku. Největší podvozkové nohy využijeme v případě, kdy pod spodní desku instalujeme velký náklad (zatížení) jako je například závěs pro kameru.



**Obrázek 17: 3D printed F450 type quadcopter - neosazená konstrukce**

Zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:1206960>



**Obrázek 18: 3D printed F450 quadcopter**

Zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:1206960>

## 3 Popis stávající konstrukce

### 3.1 Sběr dat a výběr komponentů

Od února 2018 docházelo k pravidelným schůzkám, na kterých se navrhovali a probírali různé možnosti provedení. Postupně byla shromážděna jednotlivá data, jaké kvadrokoptéry se v současné době nachází na trhu, a to převážně komerční kvadrokoptéry, nikoliv tištěné. Poté přišlo na řadu promyšlení, jaké možnosti vytvoření naší vlastní v kolejních podmínkách. Pročtením několik internetových stránek s tematikou dronů a multikoptér, různých modelářských obchodů apod., bylo hned od začátku jasné, že naše kvadrokoptéra musí být schopná nést GoPro kameru a její gyroskopický stabilizátor (gimbal). Tím bylo rozhodnuto o velikosti celé kvadrokoptéry - rozteč rotorů okolo 500mm, vzletová hmotnost do 2000g a doba letu okolo 20 minut.

Dalším krokem bylo hledání komponentů, které se použijí. Motory SL221/920KV CW CCW, které jednotlivě s vrtulí 9,4x4,3" při napětí 14,8V spotřebovávají proud 10,8A, vytváří příkon o velikosti 159,8W a tah 960g. Při užití stejné vrtule a zmenšeném napětí na 11,1V mohou jednotlivé motory spotřebovávají proud 7,2A, vznikající příkon je potom pouhých 73,9W a tah 660g na každý motor. K těmto motorů byl vybrán regulátor otáček ESC Quadcopter Q Brain 4x25A 2-4S 3A SBEC, tedy jeden společný regulátor pro všechny motory. Což se později ukázalo jako jedna z nevýhod elektroinstalace. Pro jednoduchost montáže byly použity vrtule běžně používané pro kvadrokoptéry DJI Phantom 9,4x5" CW a CCW. Stabilizačním systémem kvadrokoptéry byla zvolena řídicí jednotka SP Racing F3 Acro, která je určená i pro FPV řízení. Ovládání potom bylo zajištěno vysílačem Turnidy 9X 2,4GHz 9ch s přijímačem FrSky. Posledními díly elektroinstalace už jsou jen GoPro kamera a Profesionální 3-osý gimbal TAROT T4-3D.

V Tabulce 1 uvádím hmotnosti jednotlivých komponentů.

**Tabulka 1: Hmotnost komponentů**

<b>Motory</b>	SL221/920KV CW CCW - 4ks	4x62g = 248 g
<b>Regulátor</b>	ESC Quadcopter Q Brain 4x25A 2-4S 3A SBEC	117 g
<b>Akumulátor</b>	Multistar High Capacity 5200mAh 4S	433 g
<b>Přijímač</b>	FrSky	15 g
<b>Řídicí jednotka</b>	SP Racing F3 Acro	19 g
<b>Závěs kamery - gimbal</b>	Tarot T4 3D	178 g
<b>Kamera</b>	GOPRO	117 g
<b>Vrtule</b>	DJI Phantom 9,4x5"	4x26 = 104 g
<b>Celkem</b>		1 231 g

V součtu samotná elektronika činí 1 231 g a představuje tak většinu vzletové hmotnosti. Z toho vyplynulo, že samotná konstrukce musí být velmi lehká, aby byla docílena plánovaná celková hmotnost, a zároveň rám musí být pevný a tuhý.



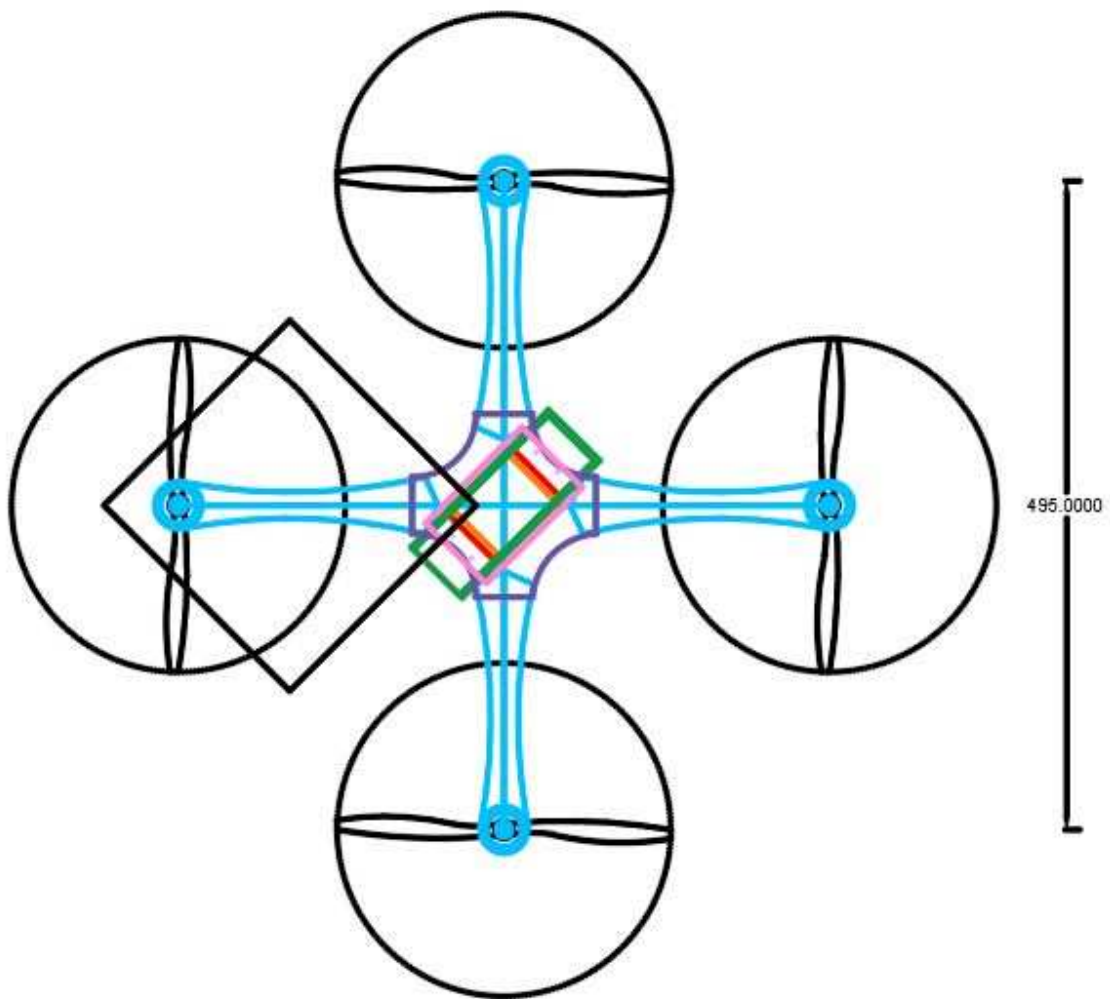
## 3.2 Konstrukce

### 3.2.1 Obecná charakteristika

Základem kvadrokoptéry jsou dvě středové desky, mezi které jsou přiroubována 4 ramena nesoucí nosné rotory. Ke spodní desce jsou přišroubovány podvozkové nohy s lyžemi pro lepší stabilitu při položení na různý podklad. Ve vytvořeném prostoru mezi rameny a deskami je umístěn akumulátor, tedy v místě těžiště celé kvadrokoptéry, a přichycen na pásky se suchým zipem. Dále ke spodní desce byly přišroubovány 2 sloupky a celý 3-osý gimbal. Horní deska byla hlavní základnou pro celou elektroinstalaci, ta byla k desce přilepena oboustrannou lepící páskou. Další součástí kvadrokoptéry byly kryty rotorů, které slouží k ochraně vrtulí proti poškození při nárazu do překážky a byly přilepené vteřinovým lepidlem k ramenům.

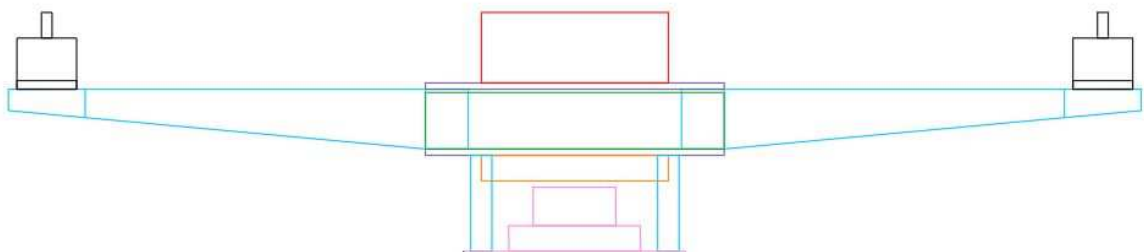


Obrázek 19: Koncept první konstrukce



**Obrázek 20: Schéma kvadroptéry**

Schématicky znázorněný tvar kvadroptéry byl vytvořen v programu AutoCAD. Prvním krokem týmu bylo vytvořit právě tento náčrt s představou velikosti. S nezkušeností ovlivňování se jednotlivých rotorů byla rozteč zvolena 495 mm.

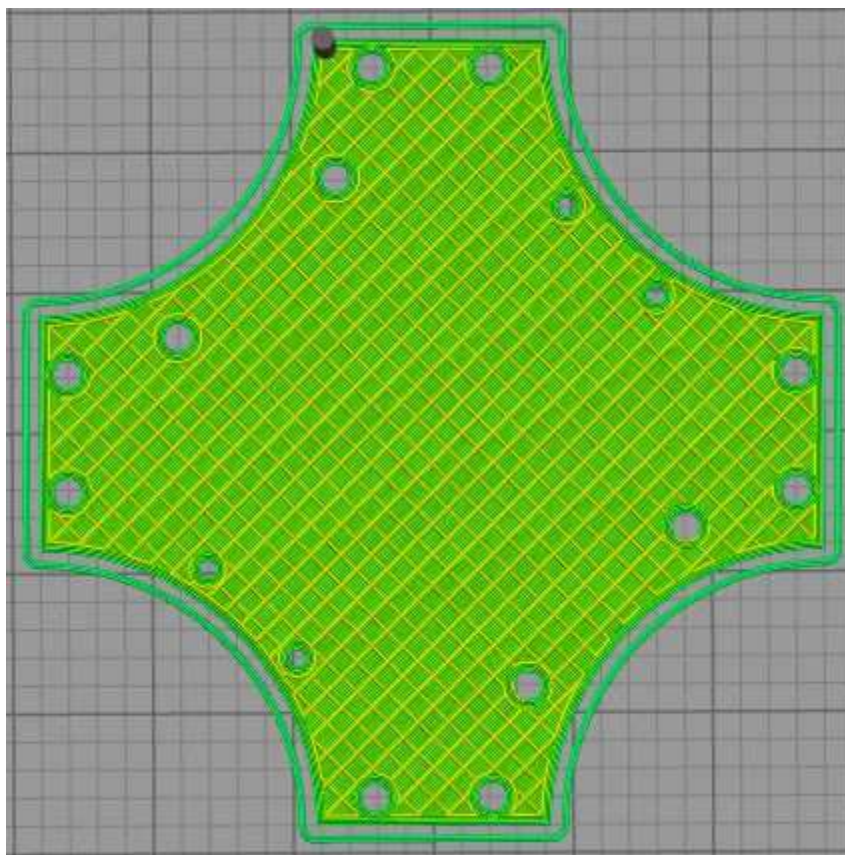


**Obrázek 21: Schéma rozmístění elektroniky**

### 3.2.2 Středové desky

Základem je čtvercová deska o hraně 140 mm, která je zmenšená o čtyři čtvrtkružnice z každého rohu o poloměru 49mm. Dále je zde osm otvorů o průměru  $\varnothing 5$  mm pro spojovací šrouby M4 ve zbylých výsečích. Na spodní desce dále najdeme čtyři otvory o průměru  $\varnothing 5$  mm pro přichycení podvozkových noh. Dle Strojnických tabulek průměr děr pro šroub M4 v hrubé řadě je  $\varnothing 4,8$  mm, z důvodů minimálních zkušeností s 3D tiskem a předpokládanými nepřesnostmi byl zvolen průměru  $\varnothing 5$  mm. V případě volnosti šroubů by se použily podložky pod hlavy šroubů i pod matice.

Tloušťka samotné desky činí 3mm. Díky technologii 3D tisku je deska skořepinová s vnitřní odlehčenou strukturou tvořenou čtverci otočené o  $45^\circ$  k rovným hranám, které při zachování tuhosti odlehčí celou desku.



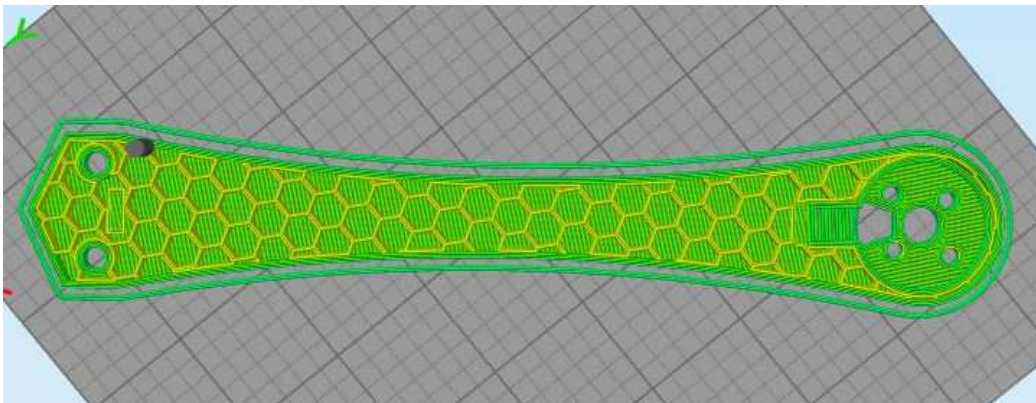
Obrázek 22: Spodní deska v řezu v programu Simplify 3D

### 3.2.3 Ramena

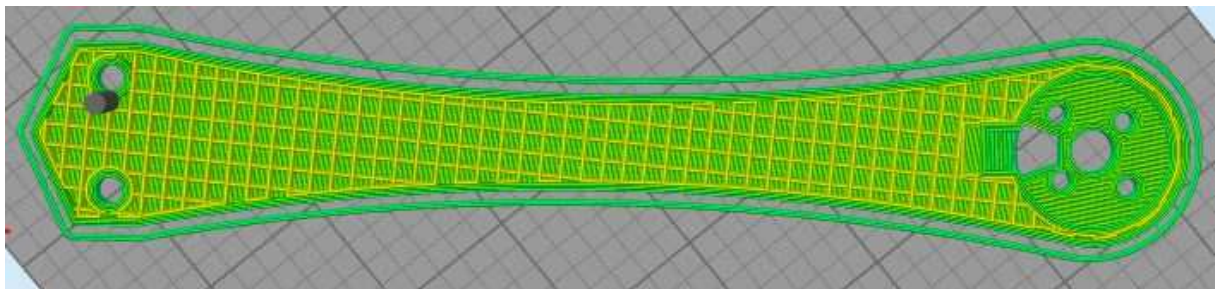
Masivní ramena jsou dlouhá 215,5mm, výška je 34mm a postupně se zmenšuje na 10mm do prostoru pod motory. Zde je ještě vybrání pro snadnou montáž motorů a zamaskování kabelů, a tak tloušťka pod motory činí pouhých avšak dostačující 5mm. Šířka ramene v místě spoje s deskou je 34,5mm a zde nalezneme dva otvory o průměru  $\varnothing 5$  mm pro šrouby M4. Pod motorem je rameno široké 36mm a v nejužším místě ramena, tedy v designu prvku zúžení na středu ramene, je šířka 18mm. Ze spodní strany vede skrz rameno drážka široká 7mm pro kabely od motoru k regulátoru.

Stejně jako u středových (základních) desek je zde využito odlehčení v podobě vnitřní struktury čtverců potočených k vnějšímu obrysu ramene o úhel (není jasné o jaký úhel se jedná vůči hranám, i když software uvádí 45°).

Ramena této konstrukce jsou velmi pevná a tuhá. Po vytištění prvního ramene, byl každý člen naší skupiny zvědavý, co rameno vydrží, a tak byla proveden jednoduchý pevnostní test přímo v naší kolejní laboratoři, který měl simulovat tvrdý náraz ramene do země. Jelikož nebylo k dispozici žádné laboratorní vybavení, zkouška proběhla primitivním způsobem - praštěním ramenem o hranu stolu. Po prvním nárazu na rameni nebyly téměř žádné známky poškození. Druhá rána po sobě už zanechala stopy poškození, avšak jednalo se spíše o poškození vrchní krycí vrstvy, ale rameno zůstalo tuhé. Překvapením pro všechny bylo, že až třetí rána poškodila strukturu na tolik, že došlo k přelomení ramena. Bohužel z této zkoušky není žádný fotografický záznam.



Obrázek 23: Rameno v řezu v programu Simplify3D - hexagonální výplň



Obrázek 24: Ramenov řezu v programu Simplify3D - čtvercová výplň

Na fotografiích jsou vidět dvě základní možnosti výplně ramene. První z možností hexagonální výplň, tvar medového plástvu, nebyla pro první pokusy využita z důvodu nezkušenosti softwaru pro vytvoření souboru pro 3D tiskárnu. Druhá z možností byla standardním nastavením, a tak posloužila pro tisk všech prvků.

V průběhu vývoje a poznávání možností softwaru byla nejprve vyzkoušena hexagonální výplň, a následně i další možnosti výplní, které se v našem případě neukázaly jako vhodné kvůli tvarové rozmanitosti komponentů.



### 3.2.4 Podvozkové nohy a lyže

Při prvním návrhu byla každá podvozková noha rozdělná na polovinu pro jednodušší tisk. Podvozkové nohy mají mohutnou 15mm základnu pro přišroubování ke spodní desce. Z ní potom pokračují už samotné nohy obdélníkového průřezu se stěnou o tloušťce 1,5 mm a délce 115 mm.

Samotné lyže mají základnu dlouhou 220 mm, širokou 17,6 mm a vysokou 5 mm. Konce lyží jsou potom zvednuté pod úhlem 120°, tloušťce 10 mm do výšky 20 mm.

Celý "podvozek" kvadrokoptéry je vysoký 133 mm, což dává i určitou rezervu volného prostoru při tvrdším přistání s kamerou na palubě. Konstrukce je na svou velikost dostatečně pevná a tuhá, nemůžeme ale vyloučit, že při neřízeném pádu nedojde k destrukci.

### 3.2.5 Souhrn

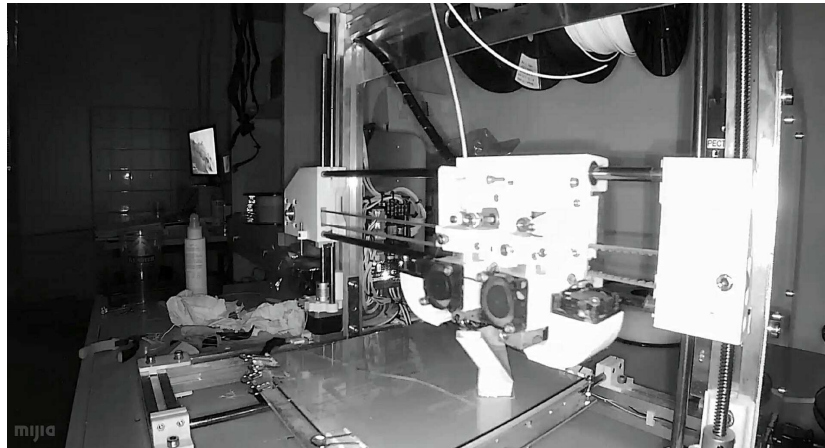
Hmotnost jednotlivých dílů se liší v závislosti na vnitřní struktuře tisku a použitém materiálu k jejich tvorbě. Materiály, které jsme pro tvorbu naší kvadrokoptéry využili, jsou rozvedené v následující kapitole Materiály pro 3D tisk.

V následující tabulce 2 jsou uvedeny hmotnosti jednotlivých dílů vyrobené z materiálu PLA a vnitřní čtvercovou konstrukcí.

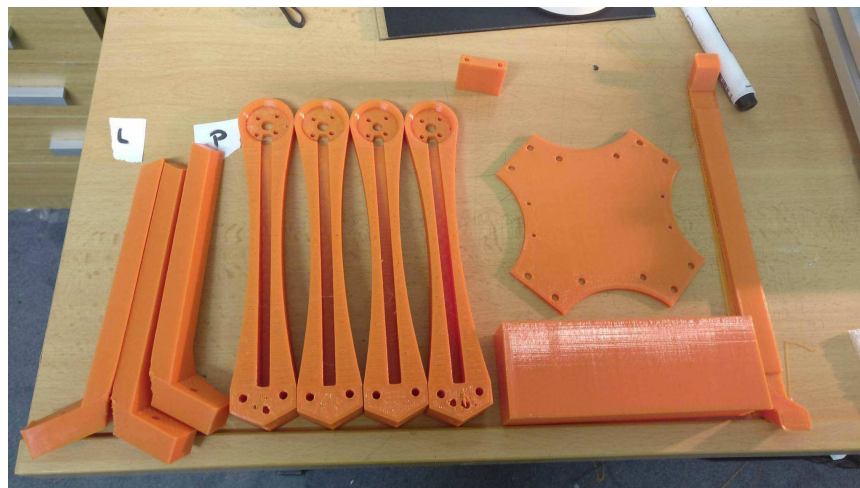
**Tabulka 2: Hmotnost dílů**

Spodní deska	30 g
Horní deska	40 g
Ramena	4x60g = 240 g
Podvozkové nohy a lyže	170 g
Sloupky Gimbalu	12 g
Spojovací materiál	90 g
Kryt akumulátoru	60 g
Celkem	630 g

Pro první pokusy tisku byl použit oranžový materiál PLA. Následující obrázky zachycují tisk dílů na 3D tiskárně Poseidon DUO, část vytištěných dílů z PLA a první složení celku. Poté následovalo osazení konstrukce kompletní elektronikou a funkčními prvky.



Obrázek 26: Záznam z kamery během tisku



Obrázek 27: Část vytištěných dílů



Obrázek 25: První sestavení kvadroptéry

Po prvním složení bylo patrné, že konstrukce bude potřebovat drobné úpravy před prvním vzlétnutím a následnému učení létání s ní.

Mezi tyto kroky hlavně patřilo odebrání prvku krytu akumulátoru, který vypadal jako "kapsa" (šachta). I když byl tento prvek dobře vymyšlený, bylo těžké ho spojit s hlavní středovou konstrukcí (spojení s oběma deskami), dále ovlivňoval celkové spojování komponentů a neumožňoval přístup ke spojovacímu materiálu.

Při prvotním nápadu neproběhla úvaha nad bezpečností. Tím je myšlena ochrana vrtulí jednotlivých rotorů proti poškození při pádu a zároveň ochrana při manipulaci na zemi. Hmotnost jednoho krytu vrtule je 35g, celková hmotnost konstrukce se tedy navýšila o 140 g.

Úpravou prošly i další prvky jako třeba podvozkové nohy, u kterých se ukázalo, že oddělené poloviny nedrží u sebe dostatečně, vyklájí se a nesplňují svůj účel. Proto byl model podvozkových noh upraven na jeden prvek. Následovalo několik nezdařených pokusů tištění kvůli špatnému nastavení modelu v tiskárně. Podvozkové nohy se během tisku dostaly mimo tiskovou podložku, a tak bylo nutné odladit umístění modelu na tiskovou podložku.

Lehkou změnou prošly také ramena, byla to však pouze vzhledová úprava, jak je vidět na následujícím obrázku plně osazené kvadrokoptéry. Hmotnost ani tuhost ramen se nezměnila.



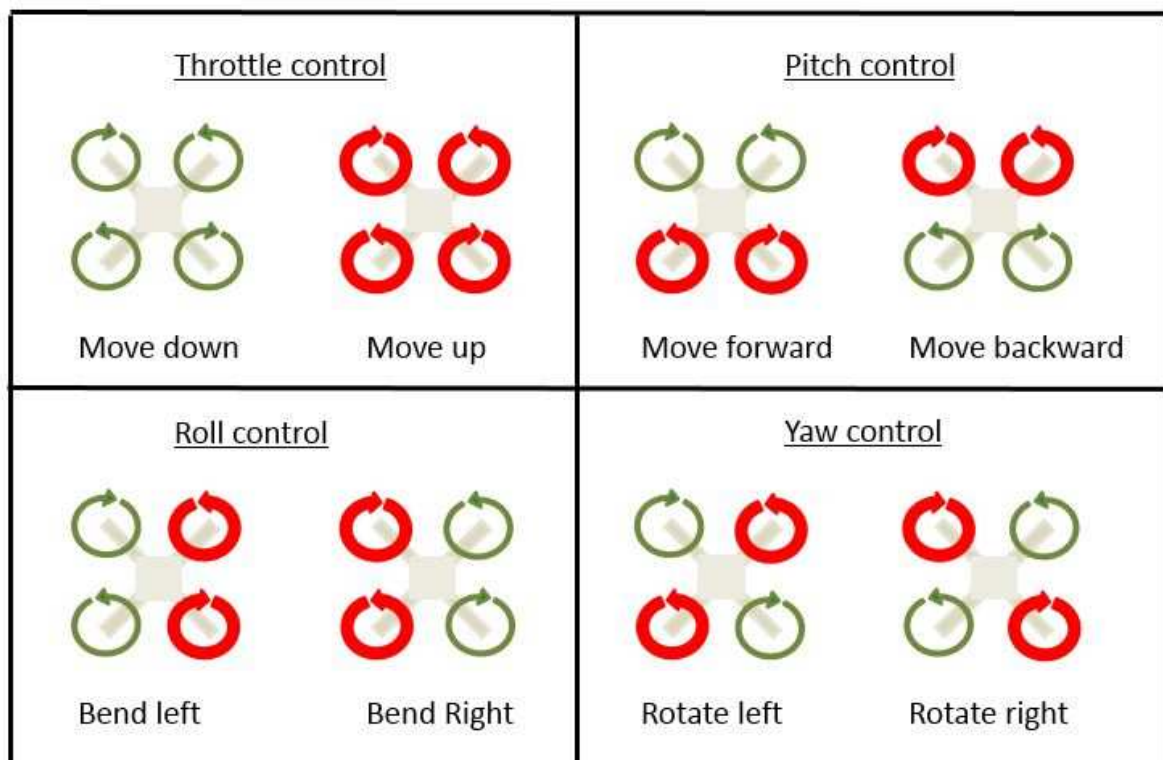
**Obrázek 28: Plně osazená kvadrokoptéra**

## 4 Princip letu kvadrokoptéry

Kvadrokoptéra je létající prostředek se šesti stupni volnosti. Může tedy vykonávat posuvný pohyb ve všech směrech os X, Y a Z, zároveň může vykonávat i sférický pohyb, tedy rotaci kolem zmíněných os. V letectví (a v anglické literatuře obecně) se používají pro natočení kolem jednotlivých os termíny **roll** (= **klopení**), **pitch** (= **klonění**) a **yaw** (= **zatačení**). Termín **roll** označuje rotaci kolem podélné osy x, klopení. Označením **pitch** myslíme rotaci kolem příčné osy y, klonění. A termínem **yaw** označujeme rotaci kolem svislé osy Z, zatačení.

[1]

Následující obrázek ukazuje jednotlivé pohyby a tahy motorů pro jejich vykonání.



Normal Speed

High Speed

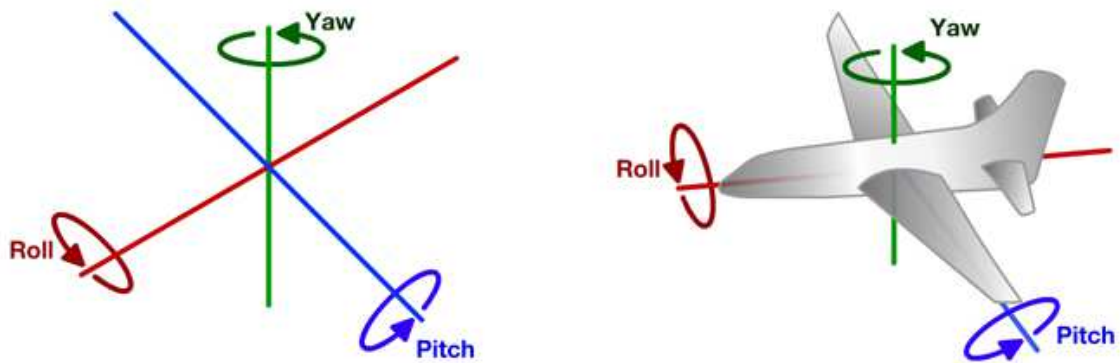
**Obrázek 29: Schéma ovládání pohybu kvadrokoptéry**

Zdroj:

[http://socialledge.com/sjsu/index.php/File:CmpE244\\_S14\\_Quadcopter\\_Quad\\_motion1.JPG](http://socialledge.com/sjsu/index.php/File:CmpE244_S14_Quadcopter_Quad_motion1.JPG)



Pro jednodušší pochopení výrazů klonění (pitch), klopení (roll) a zatáčení (yaw) je zde přidán obrázek letadla, na kterém je schéma pohybů.



**Obrázek 30: Schéma pohybů kolem os**

Zdroj: <https://www.touringmachine.com/images/PitchRollYaw.png>

## 4.1 Dynamika pohybu

V této kapitole se zabývám celkové dynamice pohybu kvadroptéry. Existují dvě konfigurace konstrukce kvadroptéry. První je tvaru "+" - plusová, vyznačuje se tím, že jeden z rotorů je umístěn ve směru letu. Druhou konfigurací je "X-ová", tedy ve tvaru písmene "x". Rozdílem mezi těmito uspořádáními je pouze rotace okolo osy Z o 45°.

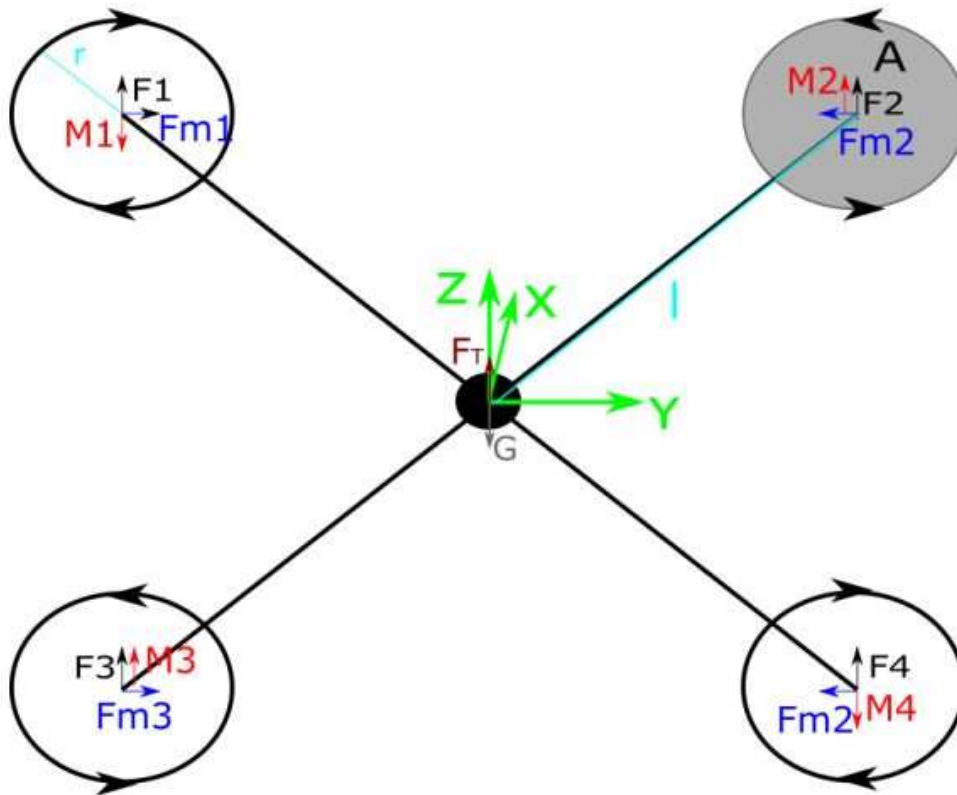
Abychom mohli popsat celkové chování, vytvoříme si pro tento účel zjednodušený model kvadroptéry.

Z literatury [2], [3], [4] vyplývá, že pokud zanedbáme rušivé veličiny jako vzdušné proudy, odpor vzduchu a další, můžeme si model kvadroptéry představit takto:

Každý z motorů vytváří točivý moment  $M$ , to způsobuje otáčení jednotlivých vrtulí. Důsledkem je vznik tahové síly  $F_{Ti}$ . Na rozdíl od vrtulníků, se kvadroptéra ovládá změnou tahu jednotlivých rotorů. Tím, že je kvadroptéra ovládána změnou tahu jednotlivých rotorů, tedy změnou jednotlivých točivých momentů, je zapotřebí tyto momenty kompenzovat, aby nedocházelo k rotaci okolo osy Z. Z tohoto důvodu je použito dvou levotočivých a dvou pravotočivých vrtulí. Motory jsou označeny po směru hodinových ručiček. Motory 1 a 3 mají směr otáčení po směru hodinových ručiček, zatímco motory 2 a 4 se otáčejí opačným směrem. Kompenzuje se tím třetí Newtonův zákon akce a reakce, a je docíleno nulového momentu.

$$\sum M_i = 0 \quad (1)$$

Na následujících jsou znázorněné k jednotlivým motorům příslušné točivé momenty a síly a princip řízení kvadrokoptéry.



**Obrázek 31: Model kvadrokoptéry**

Zdroj: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=147345](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147345)

## 4.2 Posuvný pohyb v ose Z – stoupání a klesání

Letovou výšku změníme tak, že všechny motory udržujeme na stejných otáčkách. Otáčením rotorů vznikají tahové síly  $F_1$  až  $F_4$ . Vektorovým součtem získáme celkovou tahovou sílu  $F_T$ . Kvadrokoptéra začne stoupat je-li  $F_T$  větší než tíhová síla  $G$ . V opačném případě, tedy tahová síla  $F_T$  je menší než tíhová síla  $G$ , potom bude klesat. Nastane-li rovnost mezi oběma silami, kvadrokoptéra bude udržovat letovou hladinu, tzv. "visení" - v anglické literatuře tento stav nalezneme pod pojmem *hover*.

$$G = m \cdot g, \quad (2)$$

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + F_4, \quad (3)$$

$$F_V = F_T - G. \quad (4)$$

$G$  ... tíhová síla [N]

$m$  ... hmotnost kvadrokoptéry [kg]

$g$  ... gravitační zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ], lze předpokládat gravitační konstantní  $g=9,81 \text{ ms}^{-2}$

$F_T$  ... celková tahová síla všech motorů [N]



$F_i$  ... jednotlivé tahové síly motorů 1-4 [N]

$F_V$  ... výsledná síla působící na kvadrokoptéru [N]

Z předchozích vztahů je možné odhadnout zrychlení, které bude kvadrokoptéra schopna vyvinout. Pro výpočet zrychlení využijeme druhý Newtonův pohybový zákon.

$$F_V = m \cdot a \rightarrow a = \frac{F_V}{m} \quad (5)$$

$F_V$  ... výsledná síla působící na kvadrokoptéru [N]

$m$  ... hmotnost kvadrokoptéry [g]

$a$  ... zrychlení v ose Z [ $\text{ms}^{-2}$ ]

### 4.3 Posuvný pohyb v osách X a Y – let dopředu a do boku

Posuvný pohyb v osách X a Y lze popsat obdobným způsobem. Aby došlo k takovému pohybu, celá konstrukce se musí naklonit. Tím dojde k rozložení tahové síly do dvou složek a to ve směru pohybu (do osy X nebo Y) a ve směru vzhůru (do osy Z). Jednotlivé složky sil se vypočítají z rozkladu sil.

### 4.4 Otáčení kolem osy X a Y

Při otáčení kolem os X či Y, tedy klopení a klonění (v anglické literatuře **roll** a **pitch**) koná kvadrokoptéra sférický pohyb. Příslušné dvojice motorů zvýší své otáčky a druhá dvojice své otáčky zachová stejné nebo je sníží. Každá dvojice motorů vytváří různé momenty síly. Důsledkem toho se začne naklánět celá konstrukce kvadrokoptéry.

$$M = F \cdot l. \quad (6)$$

Pro rotaci kolem osy Y platí:

$$M_y = [(F_1 + F_2) - (F_3 + F_4)] \cdot l. \quad (7)$$

Pro rotaci kolem osy X platí:

$$M_x = [(F_1 + F_3) - (F_2 + F_4)] \cdot l. \quad (8)$$

$M$  ... moment síly [Nm]

$M_i$  ... moment síly na jednotlivých ramenech kvadrokoptéry [Nm]

$M_x, M_y$  ... moment síly v ose X, Y [Nm]

$l$  ... vzdálenost od osy otáčení [m]

Moment setrvačnosti lze podle literatury [5] vyjádřit:

$$J = \int r^2 dm. \quad (9)$$



Celou kvadrokoptéru si představíme jako soustavu pěti hmotných bodů, potom můžeme předchozí vztah přibližně přepsat do následující podoby:

$$J = \sum m_i \cdot r_i^2. \quad (10)$$

**J** ... moment setrvačnosti [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]

**$m_i$**  ... hmotnost hmotného bodu [kg]

**$r_i$**  ... vzdálenost hmotného bodu od těžiště [m]

Úhlové zrychlení  $\epsilon$  získáme jako podíl momentu síly a příslušného momentu setrvačnosti:

$$\epsilon_x = \frac{M_x}{J_x}, \quad (11)$$

$$\epsilon_y = \frac{M_y}{J_y}. \quad (12)$$

**$\epsilon_x, \epsilon_y$**  ... úhlové zrychlení v ose X, Y [ $^\circ/\text{s}$ ]

**$M_x, M_y$**  ... moment síly v ose X, Y [Nm]





## 4.5 Otáčení kolem osy Z

Rotace kolem osy Z vzniká v důsledku reakčních momentů točících se vrtulí. Aby došlo k zatáčení (v anglické literatuře **yaw**), je podmínkou zvýšit tah motorů otáčejících se v jednom směru. K rotaci nebude docházet v případě, kdy výsledný reakční moment (respektive součet všech reakčních momentů) bude nulový - což vyplývá z rovnice (1). V opačném případě bude kvadrokoptéra rotovat kolem osy Z, tedy měnit kurz.

Je nutné si uvědomit, že celou kvadrokoptéru je velmi těžké ovládat pouze ručním ovládáním, kdy na kvadrokoptéru působí mnoho okolních vlivů, jako jsou například vzdušné proudy, výrobní nepřesnosti, nestejný tah všech ramen. Téměř každá kvadrokoptéra proto obsahuje řídicí desku, která zajišťuje stabilizaci letu.



## 5 Výpočty

Předchozí kapitola se zabývala jednotlivými fyzikálními vztahy pro výpočet dynamiky pohybu. Aby bylo možné znát základní parametry prvotního návrhu, jsou zde provedeny výpočty těchto parametrů. Základním údajem pro výpočet je vzletová hmotnost  $m = 1,947$  kg, tíhové zrychlení  $g = 9,81$  m s<sup>-2</sup>.

Dosažením do rovnice (2) získáme hodnotu tíhové síly první kvadrokoptéry.

$$G = m \cdot g = 1,947 \cdot 9,81 = 19,1 \text{ N.}$$

Tah jednoho motoru, udávaným výrobcem, je 960 g. Tahovou sílu jednoho motoru lze spočítat stejně jako tíhovou.

$$F_i = m_t \cdot g = 0,96 \cdot 9,81 = 9,418 \text{ N.}$$

Prostým součtem jednotlivých sil  $F_i$  se dosáhne celkové tahové síly  $F_T$  z rovnice (3):

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 4 \cdot F_i = 4 \cdot 9,418 = 37,672 \text{ N.}$$

Výsledná síla působící na celou kvadrokoptéru z rovnice (4) činí:

$$F_V = F_T - G = 37,672 - 19,1 = 18,572 \text{ N.}$$

Zrychlení kvadrokoptéry snadno získáme z druhého Newtonova pohybového zákona - rovnice (5):

$$a = \frac{F_V}{m} = \frac{18,572}{1,947} = 9,54 \text{ ms}^{-2}.$$

Z rovnic (7) a (8) lze spočítat i momenty k osám x a y, vzdálenost od osy otáčení je  $l = 0,175$ m:

$$M_y = [(F_1 + F_2) - (F_3 + F_4)] \cdot l = 2 \cdot (9,418 - 0) \cdot 0,175 = 3,296 \text{ Nm},$$

$$M_x = [(F_1 + F_3) - (F_2 + F_4)] \cdot l = 2 \cdot (9,418 - 0) \cdot 0,175 = 3,296 \text{ Nm}.$$

Moment setrvačnosti vyjádříme z rovnice (10):

$$J = \sum m_i \cdot r_i^2 = 4 \cdot 0,13 \cdot 0,245^2 = 0,31213 \text{ kgm}^2.$$

Dále lze jednoduše dopočítat úhlová zrychlení z rovnice (11) a (12), příslušené hodnoty  $J_x$  a  $J_y$  byly získány z Autodesk Inventoru:

$$\varepsilon_x = \frac{M_x}{J_x} = \frac{3,296}{0,027279} = 120,83 \text{ s}^{-2}, \quad \varepsilon_y = \frac{M_y}{J_y} = \frac{3,296}{0,026769} = 123,13 \text{ s}^{-2}.$$



## 6 Popis technologie 3D tisku

Základní definice 3D tisku je:

3D tisk neboli aditivní výroba také inkrementální nebo přírůstková výrobní technologie je proces tvorby třídimenzionálních pevných objektů z digitálního souboru. V aditivních procesech je objekt vytvořen pokládáním souvislých vrstev materiálu, dokud není celý projekt dokončen. Každá z těchto vrstev může být považována za úzce rozříznutou horizontální sekci daného objektu.

[6]

Za obdobnou a podrobnější definici můžeme považovat:

3D tisk je proces při kterém vzniká trojrozměrný výtisk nanášením jednotlivých vrstev. 3D tisk je označován jako aditivní výroba (přidáváme materiál). Výhodou aditivní výroby je možnost výroby komplexnějších trojrozměrných objektů, které mohou být klasickým obráběním nevyrobitelné. Při aditivní výrobě je minimální odpadní materiál ve srovnání s klasickým obráběním jako jsou frézování nebo soustružení. 3D tisk má několik technologií zpracování tiskového materiálu.

[7]

### 6.1 Technologie a principy 3D tisku

Internet popisuje několik desítek zkratk a názvů tiskových technologií. Mnohé jsou si velmi podobné, ovšem podléhají příslušným právům, patentům a ochranným známkám vlastníka a ostatní výrobci si pro stejný způsob technologie musí vymyslet svůj vlastní název i zkratku.

Příkladem je tisk tavené struny, filamentu, kde společnost užívá název PJP = Plastic Jet Printing, tryskový tisk plastu, společnost Stratasys používá FDM = Fused Deposition Modeling, fúzované depoziční modelování, a další výrobci užívají FFF = Fused Filament Fabrication, výroba taveného vlákna. Avšak téměř vždy jde o shodný princip a technologii výroby. Aby nedošlo k porušení práv, využijí označení FFF. Jak už bylo řečeno jedná se o aditivní technologii, jež v zásadě využívá čtyř základních principů, kdy je základním dělení určeno způsobem zpracování materiálu modulu:

**Princip 1** – tekutý materiál je vytvářen v definované vrstvě (např. SLA = Stereolitografie)

**Princip 2** – materiál je pojen pomocí lepidla, laseru apod. na podložce (např. SLS = Selektivní laserová spékání)

**Princip 3** – oddělování materiálu v každé vrstvě (např. LOM = Laminated Object Manufacturing = výroba laminátových předmětů)

**Princip 4** – materiál je vytlačován tiskovou hlavou (např. FFF)

[8]



### 6.1.1 Princip 1 - Stereolitografie (SLA)

Tato metoda je nejstarší technologií 3D tisku, funguje na principu vytvrzování tekutého polymeru pomocí laserového záření. V nádobě s tekutým polymerem je umístěna tisková deska, jejíž úroveň proti hladině polymeru určuje výšku požadované tiskové vrstvy. Světelný paprsek vykreslí požadovaný tvar vrstvy a tím dojde k vytvrzení polymeru v příslušném tvaru. Následně se tisková deska posune a světelný paprsek vykreslí a vytvrdí další požadovaný tvar. Využívá se záření různých vlnových délek (310-410 nm). Technologie stereolitografie je jedna z nejpřesnějších, přesnost v osách XY je již od jednotek  $\mu\text{m}$ . Osa Z pracuje s výškou vrstvy 15 – 100  $\mu\text{m}$ . Díky malým výškám vrstvy je povrch součástí velmi hladký, vrstvení tisku bývá těžko rozeznatelné.

Nevýhoda této technologie je pořizovací cena v řádech statisíců. Také cena materiálu začíná na 10.000,- Kč/kg. Používají se pulzní laserové diody, výkon těchto diod se liší dle použitého fotopolymeru a výrobce zařízení. Laserový svazek se pomocí rotujícího zrcátka a hranolu fokusuje na hladinu fotopolymeru, hladina je „zmáčknutá“ na výšku vrstvy mezi tiskovou podložkou a separační fólií na skle. Tato fokusace probíhá v ose Y, celá laserová hlava se pohybuje v ose X. Směr tisku je v ose Z směrem dolů. Při tisku dochází k odtrhávání materiálu od separační fólie, tato část tisku je problematická a při nesprávné orientaci modelu může dojít k nesprávnému odtržení tisku od separační fólie. Zhotovený výtisk je následně třeba omýt v izopropylalkoholu a dodatečným UV světlem definitivně vytvrdit. Do dnes je SLA jednou z nejpřesnějších technologií s nabídkou desítek různých druhů polymerů.

Tuto technologii vyvinul zakladatel společnosti 3D Systems, pan Chuck Hull. Na konci osmdesátých let 20. století spatřila světlo světa první komerční 3D tiskárna SLA.

### 6.1.2 Princip 2 - Selektivní laserové spékání (SLS)

Tato technologie spočívá v spékání práškových materiálů, nejčastěji kovových, keramických nebo plastových a také materiálu na bázi sádry. Výhodou této technologie je absence dodatečných podpor, a to z důvodu neustálého obklopení výtisku zbytkovým nespečeným materiálem. Na tiskové desce je rozprostřen stavební materiál ve formě prášku, který se v požadovaných bodech speče, následně se tisková deska posune o úroveň definované výšky. Nanese se delší souvislá vrstva prášku, speče se a celý proces se opakuje.

Obdobné je SHS (Selective Heat Soltering), které místo spékání laserem, využívá několik tisíc topných těles. Přesnost XY této technologie je do 100  $\mu\text{m}$ . Nevýhoda technologie je nákladnější čištění stroje a výtisků od jemného prášku. Dalšími podobnými technologiemi jsou CJP (Color Jet Printing) a DMP (Direct Metal Printing). Technologie CJP je v současnosti nejrychlejší a jedinou, která dokáže vytisknout téměř fotorealistický 3D model.



### 6.1.3 Princip 3 - Laminated Object Manufacturing (LOM)

Tento princip využívá jako stavební materiál zpravidla papír nebo folii. Tvar vrstvy „tištěného“ modelu je vyříznut z materiálu nožem a následně je další vrstva přilepena na předchozí. Nová vrstva materiálu je odvinuta z role nebo podána ze zásobníku (např. A4, A3, apod.) Po vytištění vrstvy je možné vrstvu obarvit pomocí principu inkoustové hlavy. Můžeme tím docílit i barevných efektů finálního modelu. Je zvláštní mluvit v tomto případě o 3D tisku, jelikož se model netiskne, nýbrž je vyřezáván. Nic méně materiál se přidává, proto je rovněž aditivní technologií. Vzhledem k tomu, že se model vlastně netiskne, ale vyřezává, je trochu zvláštní hovořit o 3D tisku. Nic méně – materiál (v roli nebo v zásobníku papíru) se bezesporu přidává, proto je tato technologie rovněž aditivní a má v tomto výčtu své místo.

Tato metoda je obecně mezi výrobci nejméně aplikována.

### 6.1.4 Princip 4 - Termoplastické vytlačování (FFF)

V angličtině označováno jako Thermoplastic extrusion, FFF - Fused Filament Fabrication, nebo FDM – Fused Deposition Modeling (FDM je ochrannou známkou firmy Stratasys Inc.). Tiskový materiál v podobě struny, též označované jako filament, se pomocí trysky nataví a nanese na tiskovou desku. Po dokončení tisku vrstvy se tisková hlava (v některých případech deska) posune o jedno vrstvu a zahájí se tisk další vrstvy.

Pro tuto metodu jsou typické dva průměry strun: 1,75 mm a 3 mm. Průměr 1,75mm lze snadno použít pro rychlejší tisk, díky menšímu průměru způsobuje menší odpor ve výstupní trysce.

Nespornou výhodou je nejnižší pořizovací cena 3D tiskárny, samotná tiskárna je jednoduchá na sestavení a je téměř bezúdržbová. Také široké spektrum stavebního materiálů a nízké náklady na jeho pořízení jsou kladem. Nevýhodou je dlouhý čas tisku, značný rozptyl v přesnosti tisku, volbou orientace tisku modelu, způsobu a konstrukci podpěr.

V profesionální sféře se využívá technologie MJP (Multi Jet Printing = více tryskový tisk), kde tiskový materiál se tryská pomocí tisíců otvorů tiskové hlavy, který zároveň vytváří voskové podpěry. U výtisku se dosáhne velmi vysoké přesnosti detailů a rozměrů. Odplavené voskových podpěr probíhá automaticky a dokončovací operace jsou minimální nebo žádné.

[8], [9]

Pro výrobu naší kvadrokoptéry byla k dispozici 3D tiskárna Poseidon Duo. Tato tiskárna spadá do poslední zmiňované technologie. Samotný proces výroby spočíval ve vytvoření 3D modelu v CAD softwaru - Autodesk Inventor. Poté byl objekt převeden do formátu STL pro software ovládající tiskárnu zpracoval a následně mohl vytvořit G-kód, neboli jednotlivé instrukce pro pohyby motorů a ovládání trysek. Pro jejich vytvoření je možné použít několik různých programů. V našem případě byl použit nejprve základní program Slic3r, později se přešlo na sofistikovanější program Simplify3D. Když byly G-kódy



vytvořeny, byly poslány na tiskárnu a dané objekty se nechaly vytisknout z materiálů PLA. Byl to jediný materiál, který jsme měli k dispozici. Později byly vyzkoušeny i ABS a PET/PETG na menší díly kvadrokoptéry, protože se jednalo o zbylý materiál z jiných projektů. Materiály jsou popsány v následující kapitole.

Po vytištění jsme u některých dílů provedli úpravu. Ta spočívala v odlomení a zapilování tzv. podpůrných konstrukcí.

## 6.2 Materiály pro 3D tisk metodou FFF

Základní materiály, které by měla podporovat každá tiskárna, jsou PLA a ABS. Je důležité se dobře rozhodnout hned na začátku, jaké materiály požadujeme, nebo budeme využívat na tiskárně, pokud se totiž rozhodneme využít tiskárnu s uzavřeným (closed source) designem, těžko tiskárnu upravíme později pro používání nových materiálů.

[10]

Mezi další materiály, které najdeme na trhu, jsou PET, PETG, HIPS, Nylon, Polypropylen, můžeme zde najít i materiály s příměsí dřeva nebo uhlíku a dokonce i s příměsí kovů a mnoho dalších speciálních materiálů

### 6.2.1 Materiál PLA

PLA, Polylactid acid - kyselina polymléčná, je vedle ABS nejpoužívanějším materiálem pro 3D tisk metodou extruze termoplastu včetně originální technologie FDM, oblíbené především mezi domácími kutily a na školách. Tento termoplastický polyester je získáván z obnovitelných zdrojů, např. z kukuřičného nebo bramborového škrobu a je biologicky odbouratelný.

Ve srovnání s ABS je snadněji a rychleji zpracovatelný při stejných výchozích podmínkách, nicméně výrobky z něj jsou výrazně méně odolné vůči vyšším teplotám (začíná měknout již kolem šedesáti stupňů Celsia, zatímco ABS má hranici této tzv. "glass-transition temperature" až na sto stupních.

[11], [16]

Výhodou proti ABS je, že není tolik náchylné k deformacím a vadám vlivem chladnutí vytištěného materiálu. Není tedy striktně požadováno, aby pracovní podložka byla vyhřívána.

Využití tohoto materiálu je tedy vhodné pro pohledové objekty, které získají vyšší lesk, a dále je vhodný i pro velké objekty.



### Materiálový list - mechanické vlastnosti Filaments

hustota: 1,24 g/cm<sup>3</sup>

mez pevnosti v tahu: 63 MPa

modul pružnosti v ohybu: 3500 MPa

teplota tisku: 185-235°C

teplota extrudéru: 150-210°C

teplota podložky: není požadována, 0-60°C

délkové prodloužení: 4%

### **6.2.2 Materiál ABS**

ABS, akrylonitrilbutadienstyren, je termoplastický materiál, používaný nejen pro stavbu modelů na 3D tiskárny. Tento materiál je vhodný pro tisk funkčních věcí. Jeho výhodou je tuhost, odolnost proti nízkým i vysokým teplotám a chemikáliím (kyseliny uhlovodíkové, oleje) a zdravotní nezávadnost. Díly z ABS je možné lepit polyakrylátovými lepidly.

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk metodou extruze polymeru, včetně technologie FDM, při níž mu zdatně sekunduje taktéž populární PLA.

[12], [16]

ABS je materiálem, který je vhodný použít při tisku funkčních vzorků, výrobu nástrojů i pro výrobu věcí pro běžné použití. Není vhodné pro objekty, které by byly dlouhodobě vystavené povětrnostním vlivům ani pro medicínské aplikace.

Je náchylný k deformacím a vadám vlivem chladnutí, proto je vyžadována vyhřívaná podložka.

### Materiálový list - mechanické vlastnosti Filaments

hustota: 1,04 g/cm<sup>3</sup>

mez pevnosti v tahu: 39 MPa

modul pružnosti v ohybu: 1900 MPa

teplota tisku: 220 - 240 °C

teplota extrudéru: 220 - 275°C

teplota podložky: 80 - 105 °C

délkové prodloužení: 20%

### **6.2.3 Materiál PET/PETG**

PET/PETG je velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností. PETG má univerzální využití, ale je zejména vhodný pro tisk mechanických částí. Je možné jej použít jak uvnitř, tak i ve venkovním prostředí. PETG má velmi malou tepelnou roztažnost, na podložce se tedy nekroučí a tudíž není problém s tiskem velkých modelů

Tisknutí s ním je téměř stejně snadné jako s PLA, ale na rozdíl od PLA může nabídnout mnoho lepších mechanických vlastností. Písmeno G v zkratce PETG označuje glykol, který se přidává během výrobního procesu. Glykol modifikuje vlastnosti PET, aby byl méně křehký, snadnější pro tisk a více průhledný při tisku s poloprůhlednými



variantami. PETG má nízkou tepelnou roztažnost, takže i při tisku velkých modelů se zřídka kdy zkroutí a odlepí od vyhřívané podložky. PETG je navíc houževnatý, tak akorát pružný a díky tomu se při namáhání často jen dočasně prohne, což zabrání prasknutí.

[13], [16]

Polyethylentereftalát (PET) je nejvíce běžně používaný plast na světě - láhve, oděvní vlákna, nádoby a obaly na potraviny.

PET-G je upravená verze PET. "G" znamená "modifikovaný glykol", který se přidává k materiálové kompozici během polymerace. Výsledkem je vlákno, které je jasnější, méně křehké a snadněji se používá než jeho základní forma PET (PETG je vysoce odolný proti nárazu na rozdíl od PET). V chemii se tento materiál označuje jako (polyethylentereftalát-1,4-cyklohexylendimethylentereftalát).

PETG vlákno kombinuje vlastnosti materiálů ABS (silnější, odolnější teplotám, celkově odolnější) a PLA (snadný tisk). Adheze mezi vrstvami je obvykle vynikající, riziko zkroucení nebo výrazného smrštění není tak velké a výhodou je, že jej lze recyklovat. Mnoho výrobců a uživatelů se shoduje na tom, že nejde o nejjednodušší materiál pro tisk. Obvykle vyžaduje, abyste našli správné nastavení tiskárny. Při 3D tisku proto pravděpodobně budete muset s parametry experimentovat více než obvykle.

PETG je na rozdíl od jiných materiálů více odolný vůči kyselinám a rozpouštědlům, vysokým i nízkým teplotám. Je možné tepelně tvarovat z něj vytištěný předmět nebo jej leštit ohněm.

[14]

#### Materiálový list - mechanické vlastnosti Filaments

hustota: 1,04 g/cm<sup>3</sup>

mez pevnosti v tahu: 39 MPa

modul pružnosti v ohybu: 1900 MPa

teplota tisku: 220 - 240 °C

teplota extrudéru: 220 - 275 °C

teplota podložky: 80 - 105 °C

délkové prodloužení: 20%





Následující Tabulka 3 je převzatá a citovaná ze zdroje [15]. Zde je dobře vidět porovnání všech tří výše popsaných materiálů. Také je patrné, že každý výrobce uvádí jiné hodnoty pro tisk a můžeme si všimnout i jiných hodnot mezí pevnosti

**Tabulka 3: Materiálové vlastnosti**

	<b>PLA</b>	<b>ABS</b>	<b>PET-G</b>
<b>Teplota trysky</b>	180 - 230 °C	210 - 250 °C	220 - 260 °C
<b>Teplota podložky</b>	20 - 60 °C	80 - 110 °C	60 - 90 °C
<b>Tisková podložka</b>	Nepo- vinná	Povinná	Doporučuje se
<b>Komora při tisku</b>	Nepo- vinná	Doporučuje se	Nepovinná
<b>Přilnutí první vrstvy</b>	Dobré	Drobné problémy	Drobné problémy
<b>Výpary</b>	Skoro žádné	Silné	Silné
<b>Absorbce vlhkosti</b>	Ano	Ano	Ano
<b>Youngův modul (GPa)</b>	3,5	2,4	2,2
<b>Modul pružnosti (GPa)</b>	4	2,2	1,9
<b>Pevnost v ohybu (MPa)</b>	80	65	64
<b>Poměr pevnosti k hmotnosti (kN*m/kg)</b>	40	31-80	42
<b>Pevnost v tahu (MPa)</b>	110	37-110	53
<b>Odolnost proti nárazu (J/m)</b>	-	70-370	77
<b>Tvrdost Rockwell R</b>	-	94	108
<b>Teplota skelného přechodu (°C)</b>	60	105	81
<b>Deformace při teplotě (°C)</b>	65	100	70
<b>Teplota tání (°C)</b>	160	-	140
<b>Tepelná kapacita (J/kg*K)</b>	1800	1470	1200
<b>Tepelná vodivost (W/m*K)</b>	0,13	0,17	0,29
<b>Tepelná difuzivita (m<sup>2</sup>/s)</b>	0,058	0,12	0,19



## **7 Návrh nového konstrukčního řešení**

Nové konstrukční řešení spočívá ve změně celkové koncepce kvadrokoptéry. Její původní poslání, nést kameru a natáčet videozáznam, pro novou koncepci odpadá. Myšlenka nové kvadrokoptéry se zaměřila na zmenšení a odlehčení rámu, zrychlení a zlepšení manévrovacích schopností (více obratnější), popřípadě vyzkoušení FPV řízení, a možné zvýšení doby letu. Předpokladem je zachování co nejvíce stejných komponent, a to z důvodu nastavování a také záměn prvků elektroinstalace. Zachované zůstávají: pohonné jednotky (motory a vrtule), akumulátor, avšak i zde je možná alternativa, přijímač..

### **7.1 Změny v elektroinstalaci**

Jelikož nastala změna koncepce, je možné hned z původní elektroinstalace odečíst hmotnost dílů a součástí kamery GOPRO. Jde o odlehčení o 307 g konstrukce.

Největší změnou v elektroinstalaci prošel regulátor otáček. Původní jeden společný pro všechny čtyři motory se ukázal velmi nevhodný, protože při jednom špatném zapojení akumulátoru došlo k jeho shoření a tím i výpadku všech motorů. Proto se rozhodlo tento regulátor nahradit čtyřmi jednotlivými regulátory HOBBYWING X-Rotor 30A OPTO pro multitoroty. Nevýhodou tohoto zapojení je spojení silových kabelů s akumulátorem, ale výhody převyšují nad touto maličkostí. První výhodou je samotná hmotnost jednoho regulátoru. Ta činí pouhých 7 g, v součtu tedy všech čtyř je hodnota 28 g, což je oproti původnímu odlehčení 90 g.

Další drobnou úpravou prochází řídicí jednotka. Ta je uložena v plastovém pouzdru, které je demontovatelné. Po jejím odstranění se hmotnost jednotky dostala na 6 g. Dalších 13 g odlehčení původní elektroinstalace.

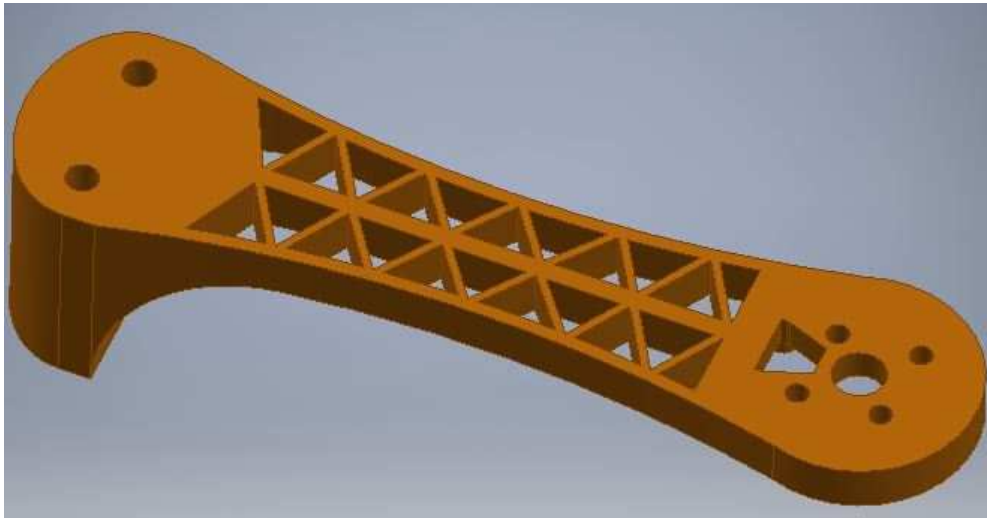
Alternativa akumulátoru spočívá v použití tří-článekového akumulátoru oproti původnímu čtyř-článekovému, který je o 100g těžší. Požadavek na rám je takový, aby bylo možné střídat oba akumulátory a zároveň byly dostatečně chráněny proti poškození.

### **7.2 Změna rozměrů konstrukce**

#### **7.2.1 Změna ramen**

Obrovskou změnou prošla konstrukce ramen. Prvotní návrh byl v duchu velké konstrukce, dostatečně pevné a tuhé, schopné nést kameru. Původní rozpětí 495 mm, bez ochrany vrtulí, bylo rozumné pro původní myšlenku. Jak se ukázalo nová konstrukce může být celkově menší. Vzdálenost mezi konci vrtulí byla příliš velká - činila 110 mm.

První změnou bylo zkrácení jednotlivých ramen při zachování tuhosti. Původní celková délka ramene se zmenšila z 215,5 mm na 146 mm. Ramena zaznamenala i další změnu, a to v celkové podobě. Původní trojúhelníkový průřez v nárysu byl změněn na

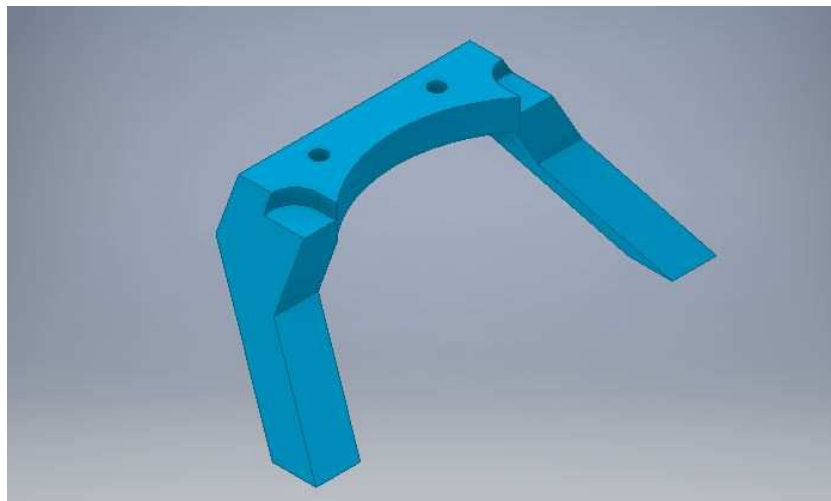


**Obrázek 32: Nový návrh ramene**

obdélníkový. Dalším prvkem jsou trojúhelníkové otvory, které nijak nenarušují pevnost konstrukci ramene a zároveň odlehčí celý rám. Podle softwarů, Autodesk Inventor a Simplify3D by se hmotnost jednoho ramene mohla pohybovat do 40 g.

### 7.2.2 Zmenšení podvozkových nohou

Jelikož nová konstrukce nemá za úkol nést kameru, není nutné zachovat stejnou výšku podvozkových noh. Dostalo se jim patřičného zmenšení. Původní výška 130 mm se změnila na 50 mm, avšak dostatečných. Jejich koncepce zůstal zachovaný, ačkoliv korekce úhlů rozevření museli být upraveny. Základní část podvozkových noh dospěla také ke zmenšení původních rozměrů. Díky duté konstrukci noh hned od prvního návrhu, nemůže se zde počítat s velkým ušetřením hmotnosti. Teoretické odlehčení konstrukce by mohlo být až 40 g pro obě poloviny. Odstraněním podvozkových lyží, které v tomto případě nejsou potřebné, bude ušetřeno 60 g. Celkové odlehčení by mohlo činit až 100 g.



**Obrázek 33: Zmenšené podvozkové nohy**



### **7.2.3 Změna základních desek**

Samotný tvar středových desek se nezměnil, změnou prošly rozměrové korekce, tak aby všechny přechodové křivky navazovali. Základní desky se zmenšily o 5 mm, z původních 140 mm. U dolní desky byly také odstraněny nepotřebné otvory.

## **7.3 Změna materiálu**

Pro výrobu základních desek by bylo vhodné využít materiálu PET/PETG. Tisknutí je téměř stejné jako PLA, ale nabízí lepší mechanické vlastnosti. Získáme tím pevnější a odolnější rám. Dalším odlehčením by se dalo dosáhnout vyrobením ramen z materiálu ABS. Vhodné by bylo použít ABS i pro podvozkové nohy.



## 8 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout nové konstrukční řešení kvadrokoptéry vyráběné technologií 3D tiskem. Nejprve bylo potřeba analyzovat a vypracovat rešerši existujících typů kvadrokoptér (velikostí), uspořádání a konstrukčních řešení.

Dále jsem popsal stávající konstrukci. V dalším kroku jsem vysvětlil princip letu kvadrokoptéry a provedl výpočet stávající konstrukce. Následovalo popsání jednotlivých technologií 3D tisku a základních materiálů používaných pro 3D tisk. U každého materiálu jsem popsal jeho výhody a nevýhody, základní materiálové vlastnosti a na závěr popsal vhodné použití daného materiálu. Následně jsem provedl návrh nového řešení, které bude menší, lehčí, avšak při zachování většiny elektroinstalace. Pomocí softwaru Autodesk Inventor jsem vypracoval jednotlivé díly, přiřadil jim materiálové vlastnosti a porovnal s původním konstrukčním návrhem. Porovnáním parametrů původní konstrukce s hodnotami návrhu, celá konstrukce by měla být odlehčená v elektroinstalaci o 403 g, s menším akumulátorem to je až 503 g. Samotná konstrukce by mohla dosáhnout odlehčení okolo 250g, v případě použití různých materiálů by mohla být odlehčení i větší. Sečtením elektroniky a konstrukce by celkové odlehčení oproti původní koncepci mohlo být v rozmezí 650 g až 770 g.

S ohledem na situaci s koronavirem COVID-19 nebylo možné ověřit mechanické vlastnosti materiálů podle materiálových (technických) listů, vytisknout jednotlivé díly a provést přímé porovnání dílů - hmotností i pevností.

I přes tyto komplikace byl cíl práce splněn a nové řešení je velmi lehké, zajímavé a doufám, že bude brzy možná nově návrh vytisknout, sestavit a vyzkoušet.



## 9 Seznam literatury

- [1] BRADÁČ, František. *Quadrokopter – stabilizace pomocí inerciálních snímačů*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [2] HOFFMANN, Gabriel, Haomiao HUANG, Steven WASSLANDER a Claire TOMLIN. *Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment: Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit* [online]. Hilton Head, South Carolina, 2007 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/f6a9/522225a98956d390f3d342244868867c472c.pdf>
- [3] GÁBRLÍK, PETR. *Quadrocopter - stabilizace a regulace*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [4] ČERNÝ, František, Ladislav SAMEK, Bruno SOPKO, Světla VACKOVÁ. *Fyzika 1*. Praha 2004. Vydavatelství ČVUT
- [5] *Next Generation UAVP* [online]. In: AmirGuindehi, 2016 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://ng.uavp.ch/FrontPage>
- [6] *3D printing* [online]. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-08].
- [7] *Co je to?* [online]. [cit. 2020-03-06] Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/co-je-to>
- [8] *3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE* [online] [cit. 2020-03-10] Dostupní z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/3d-tisk-principy-technologie>
- [9] *Technologie 3D tisku* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/technologie-3d-tisku>
- [10] *Jak vybrat 3D tiskárnu* [online][cit. 2020-03-08]Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vyber-3d-tiskarny/>
- [11] *PLA* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/pla/>
- [12] *ABS* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/abs/>
- [13] *PRŮVODCE MATERIÁLY* [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [14] *PET, PET-G, PET-G/CF* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>
- [15] *ROZDÍL MEZI ABS, PLA, PETG* [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [16] *Přehled dostupných materiálů* [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
- [17] *How to Design and 3D Print Your Very Own Quadcopter* [online]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/How-to-Design-and-3D-Print-Your-Very-Own-Quadcopter>
- [18] *3D Printed Drone Parts: All You Need to Know*. All3DP. *All3DP | World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/3d-print-drone-parts/>



- 
- [19] *How to Build your own 3D Printed Quadcopter Drone* [online]. Dostupné z:  
<https://3dprinting.com/how-to/3d-print-drone/>
- [20] *Best 3D printed drone projects* [online]. Dostupné z:  
<https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/applications-of-3d-printing/3d-printed-drone/>
- [21] *THINGS TAGGED WITH 'QUADCOPTER'* [online]. Dostupné z:  
<https://www.thingiverse.com/tag:quadcopter>
- [22] *Instructables* [online]. Dostupné z:  
<https://www.instructables.com/howto/quadcopter/>

## 10 Seznam obrázků

Obrázek 1: Příklad miniaturní kvadrokoptéry - Super Ligth Quadcopter .....	2
Obrázek 2: Základní uspořádání konstrukce .....	3
Obrázek 3: XL-RCM 10.0 PIXXY .....	4
Obrázek 4: Micro 105 FPV Qaudcopter .....	4
Obrázek 5: MINI DRONE .....	5
Obrázek 6: Foldable Brushed Microquad - rozložený stav .....	5
Obrázek 7: Foldable Brushed Microquad - složený stav .....	6
Obrázek 8: Hovership MHQ2 - rozložený stav .....	6
Obrázek 9: Hovership MHQ2 - složený stav .....	7
Obrázek 10: THE FIREFLY .....	7
Obrázek 11: X-vein drone .....	8
Obrázek 12: CargoCopter 3D .....	9
Obrázek 13: Model krabičky 3D Printed Quadcopter With Arduino .....	10
Obrázek 14: 3D Printed Quadcopter With Arduino .....	10
Obrázek 15: Foldable drone frame - DJI Mavic 3D tisk, rozložený stav .....	11
Obrázek 16: Foldable drone frame - DJI Mavic 3D tisk, složený tvar .....	11
Obrázek 17: 3D printed F450 type quadcopter - neosazená konstrukce .....	12
Obrázek 18: 3D printed F450 quadcopter .....	12
Obrázek 19: Koncept první konstrukce .....	14
Obrázek 20: Schéma kvadrokoptéry .....	15
Obrázek 21: Schéma rozmístění elektroniky .....	15
Obrázek 22: Spodní deska v řezu v programu Simplify 3D .....	16
Obrázek 23: Rameno v řezu v programu Simplify3D - hexagonální výplň .....	17
Obrázek 24: Ramenov řezu v programu Simplify3D - čtvercová výplň .....	17
Obrázek 25: První sestavení kvadrokoptéry .....	19
Obrázek 26: Záznam z kamery během tisku .....	19
Obrázek 27: Část vytištěných dílů .....	19
Obrázek 28: Plně osazená kvadrokoptéra .....	20
Obrázek 29: Schéma ovládání pohybu kvadrokoptéry .....	21
Obrázek 30: Schéma pohybů kolem os .....	22
Obrázek 31: Model kvadrokoptéry .....	23
Obrázek 32: Nový návrh ramene .....	36
Obrázek 33: Zmenšené podvozkové nohy .....	36

## 11 Seznam tabulek

Tabulka 1: Hmotnost komponentů .....	13
Tabulka 2: Hmotnost dílů .....	18
Tabulka 3: Materiálové vlastnosti .....	34





## **12 Seznam příloh**

Výkresová dokumentace:

000-08-2020-00 - RÁM KVADROKOPTÉRY

000-08-2020-01 - PODVOZKOVÉ NOHY

000-08-2020-02 - STŘEDOVÁ DESKA - DOLNÍ

000-08-2020-03 - RAMENO

000-08-2020-04 - STŘEDOVÁ DESKA - HORNÍ

000-08-2020-05 - OCHRANA VRTULE