

# NÁVRH KVADROKOPTÉRY VČETNĚ SIMULACÍ

Bc. Martin Sekerák

---

Diplomová práce  
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Sekerák**  
Osobní číslo: **T17274**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh kvadrokoptéry včetně simulací**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Naskenujte bezkontaktním způsobem kvadrokoptéru
3. Navrhněte kostru kvadrokoptéry
4. Provedte simulace modelu
5. Vytvořte prototyp

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **KEREČANINOVÁ Z. a ŘASA J. Nekonvekční metody obrábění: Rapid Prototyping. Inovace. 2008**
2. **PRŮŠA J. a PRŮŠA M. ZÁKLADY 3D TISKU. Prusa Research s.r.o., 2014**
3. **Internetový zdroj MCAE: Reverzní inženýrství. MCAE SYSTEMS**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Vojtěch Šenkeřík, PhD.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**2. ledna 2019**

Termín odevzdání diplomové práce:

**17. května 2019**

Ve Zlíně dne 1. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně .....

.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>31</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na výrobu funkčního prototypu kvadrokoptéry, která ponese akční kameru. Před samotnou výrobou kvadrokoptéry bude její počítačový model testován pomocí mechanických analýz v různých situacích. Při návrhu a výrobě kvadrokoptéry bude využito hlavně reverzní inženýrství, technologie 3D tisku a optického skeneru.

Klíčová slova: koptéra, akční kamera, 3D tisk, optický skener, reverzní inženýrství, mechanické simulace

## **ABSTRACT**

The thesis is focused on the production of a functional quadcopter prototype that carries an action camera. Before making the quadcopter itself, its computer model will be tested by mechanical analysis in various situations. Reverse engineering, 3D printing technology and an optical scanner will be mainly used to design and manufacture the quadcopter.

Keywords: copter, action camera, 3D printing, optical scanner, reverse engineering, mechanical simulation

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi, Ph.D., především za mnoho cenných rad, které mi vždy ochotně poskytnul. Dále pak panu doc. Ing. Jakubovi Javoříkovi, Ph.D., za informace ohledně tvorby simulací mechanického namáhání.

Byla to chyba, co uvedlo svět do pohybu. Nikdy se neboj dělat chyby.

(Paulo Coelho)

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 DRONY</b> .....	<b>12</b>
1.1 HISTORIE DRONŮ.....	12
1.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ DRONŮ.....	13
1.2.1 Trikopty.....	14
1.2.2 Kvadrokopty.....	14
1.2.3 Hexakopty a octokopty .....	14
1.2.4 Koaxiální kopty.....	14
1.3 DĚLENÍ DRONŮ PODLE POUŽITÍ.....	15
1.3.1 Hobby drony.....	15
1.3.2 Závodní drony .....	15
1.3.3 Spotřebitelské drony.....	16
1.3.4 Vojenské drony .....	17
1.4 VÝVOJ ŘÍZENÍ DRONŮ.....	18
<b>2 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ</b> .....	<b>19</b>
2.1 VÝZNAM REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ.....	19
<b>3 3D SKENOVÁNÍ</b> .....	<b>20</b>
3.1 TECHNOLOGIE 3D SKENERŮ .....	20
3.1.1 Laserové skenování 3D objektů .....	20
3.1.2 Optické skenování 3D objektů .....	21
3.1.3 Mechanické skenování 3D objektů .....	22
3.2 OBLASTI VYUŽITÍ 3D SKENERŮ .....	22
<b>4 3D TISK</b> .....	<b>23</b>
4.1 VZNIK STEREOLITOGRAFIE.....	23
4.2 VÝVOJ 3D TISKU .....	23
4.3 TECHNOLOGIE 3D TISKU PRO VÝROBU POLYMERNÍCH DÍLŮ .....	26
4.3.1 Technologie Fused Filament Fabric a Fused Deposition Modeling .....	26
4.3.2 Technologie Selective Laser Sintering (SLS).....	27
4.3.3 Technologie Stereolithography (SLA).....	28
4.3.4 Technologie PolyJet.....	29
<b>5 CAE SYSTÉMY</b> .....	<b>31</b>
5.1 POSTUP NASTAVENÍ ANALÝZY.....	31
<b>6 AKČNÍ KAMERY</b> .....	<b>34</b>
6.1 PARAMETRY AKČNÍCH KAMER .....	34
6.1.1 Rozlišení a FPS .....	34
6.1.2 Stabilizace .....	35
6.1.3 FOV.....	36
6.1.4 Další parametry .....	36
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>37</b>
<b>7 STANOVENÍ CÍLŮ DILPOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>38</b>
<b>8 VÝBĚR KOPTY</b> .....	<b>39</b>



8.1	PARAMETRY ZVOLENÉ KOPTÉRY .....	39
8.2	OBSAH ZAKOUPENÉHO BALENÍ.....	41
<b>9</b>	<b>VÝBĚR AKČNÍ KAMERY .....</b>	<b>42</b>
9.1	PARAMETRY ZVOLENÉ KAMERY .....	42
<b>10</b>	<b>TESTOVÁNÍ A DEMONTÁŽ KOPTÉRY SYMA X8PRO .....</b>	<b>44</b>
10.1	ZÁTĚŽOVÝ TEST .....	44
10.2	TEST VYCHÝLENÍ TĚŽIŠTĚ .....	45
10.3	DEMONTÁŽ ZAKOUPENÉHO DRONU .....	46
<b>11</b>	<b>SKENOVÁNÍ KRYTŮ .....</b>	<b>47</b>
11.1	POPIS SKENERU ATOS II TRIPLE SCAN .....	47
11.2	SKENOVÁNÍ DÍLŮ.....	48
<b>12</b>	<b>KONSTRUKCE NOVÉ KOPTÉRY .....</b>	<b>50</b>
12.1	CATIA V5R19 .....	50
12.2	MODELOVÁNÍ SOUČÁSTEK ZAKOUPENÉ KOPTÉRY .....	50
12.3	NASTAVENÍ SPRÁVNÉ POLOHY POUŽITÝCH SOUČÁSTEK .....	52
12.4	NÁVRH NOVÉHO KRYTU .....	53
12.5	ODLEHČENÍ KOPTÉRY HERO .....	55
<b>13</b>	<b>SIMULACE MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ.....</b>	<b>59</b>
13.1	NX 12 .....	59
13.2	NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK ANALÝZY .....	59
13.3	SIMULACE MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ PŘI PŮSOBNÍ GRAVITACE .....	61
13.4	SIMULACE MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ PŘI STOUPÁNÍ KOPTÉRY .....	63
13.5	SIMULACE MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ PŘI MANÉVROVÁNÍ KOPTÉRY.....	64
13.6	DEFORMACE KOPTÉRY HERO.....	65
<b>14</b>	<b>VÝROBA KOPTÉRY HERO .....</b>	<b>66</b>
<b>15</b>	<b>TESTOVÁNÍ KOPTÉRY HERO .....</b>	<b>71</b>
15.1	PRVNÍ TESTOVACÍ LETY .....	71
15.2	VYHODNOCENÍ SNÍMKŮ Z NOVÉ KAMERY .....	72
15.3	FINANČNÍ ZHODNOCENÍ.....	75
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>76</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>77</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>		<b>81</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>82</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>85</b>

## ÚVOD

Drony jsou fenoménem dnešní doby, právem si získaly obrovský nárůst popularity v posledních letech. Jejich potenciál využití ještě zdaleka není zcela objeven a stále se objevují další a další odvětví, kde je možné drony využít. Drony se pomalu stávají pravou rukou filmařům, záchranářům, policistům, armádě, nebo třeba zemědělcům.

Drony si našly své místo i v rukou laické veřejnosti a díky tomu vznikla skupina tzv. Hobby dronů. Díky vysoké konkurenci mezi výrobci těchto dronů se vývoj posouvá mílovými kroky a dnes si téměř kdokoliv může za pár tisíc korun pořídit drona, který si sám hlídá výšku letu, umí sám přistát na místo vzletu, anebo přenáší obraz z kamery v reálném čase přímo do vašeho mobilního telefonu.

Častým problémem těchto tzv. Hobby dronů je velmi nízká kvalita kamery a s tím spojená nízká kvalita pořízených snímků. Pokud již dron disponuje kvalitní kamerou, jeho cena se zpravidla pohybuje v řádech desetitisíců korun. Právě na tento problém je zaměřena tahle diplomová práce, jejímž cílem je navrhnout a vyrobit funkční prototyp kvadrokoptéry. K této kvadrokoptéře bude připevněna akční kamera, díky které bude možno pořídit snímky z výšky ve vysokém rozlišení. Při výrobě nové kvadrokoptéry bude využito principů reverzního inženýrství, takže bude nejprve zakoupena kvadrokoptéra, která bude následně přestavěna.

Ještě před samotnou výrobou kvadrokoptéry bude její počítačový model testován za pomoci softwaru, který umožňuje simulovat mechanické namáhání. Tyto softwary pomáhají konstruktérům po celém světě otestovat svoje výrobky ještě před jejich vyrobením. Hlavním důvodem testování počítačových modelů je odhalení skrytých vad výrobku, nebo třeba predikce jeho chování v reálné situaci. Získané informace o chování výrobku v reálných situacích mohou být velmi cenné, protože mohou ušetřit spoustu financí, které jsou spojeny s opravami vadného výrobku.

Otestovaný model kvadrokoptéry bude následně vyroben technologií 3D tisku. Tato technologie si v poslední době získává čím dál vyšší popularitu, protože se díky ní dají vytvořit funkční prototypy výrobků, bez nutnosti použití dalších technologií jako je např. vstřikování, které je spojené s drahou výrobou vstřikovacích forem. Posledním cílem práce pak bude otestovat vyrobený prototyp kvadrokoptéry a porovnat kvalitu pořízených snímků se zakoupenou kvadrokoptérou.

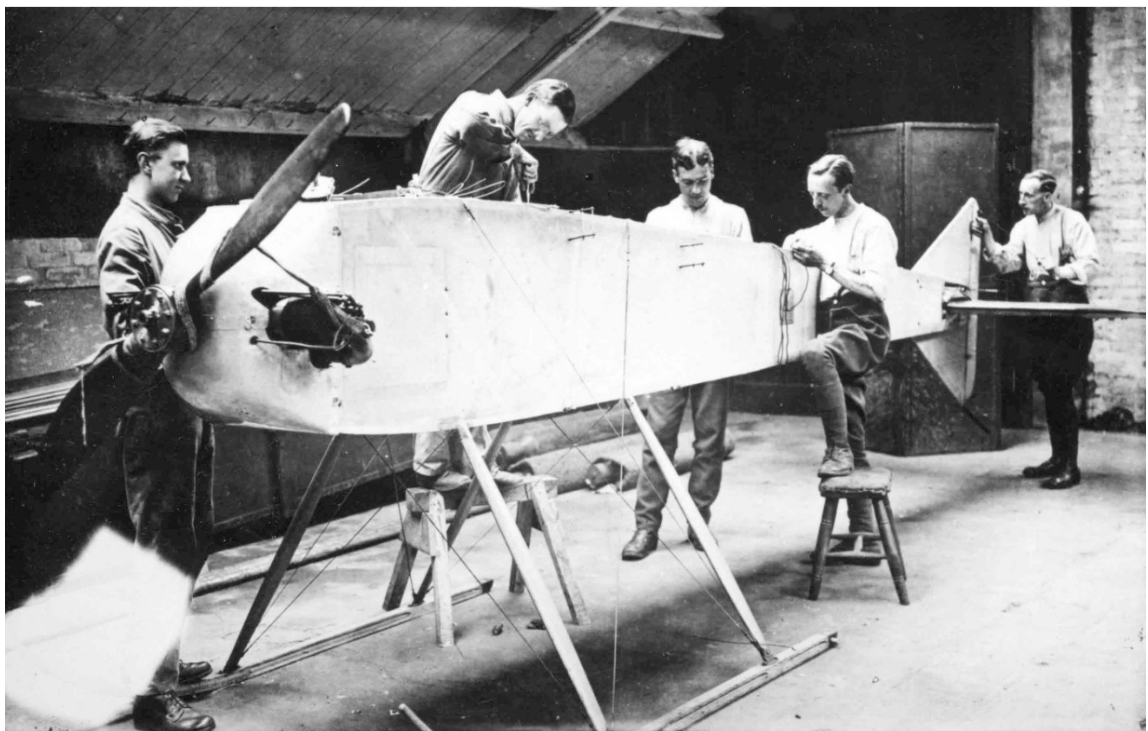
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 DRONY

Dron (z anglického drone) je slangový výraz pro letadlo bez posádky, které je řízeno na dálku. Také se můžeme setkat s názvem UAV z anglického Unmanned Aerial Vehicle, což v českém překladu znamená bezpilotní letadlo. Řízení může provádět pilot pomocí vysílačky, nebo může být dráha letu předem naprogramována.

### 1.1 Historie dronů

Vývoj dronů byl nastartován hlavně kvůli válkám a to za účelem ušetření lidských životů při bojových, nebo špionážních operacích. Vůbec první zmínky o bezpilotních letounech jsou z USA kolem roku 1916, kdy byl profesorem Archibaldem Lowem zkonstruován první dron nesoucí název Aerial Target. Tento dron byl schopný uletět až 40km, a po naváděných raketách, nebo horkovzdušných balónech s bombami, to byl první opravdový dron.

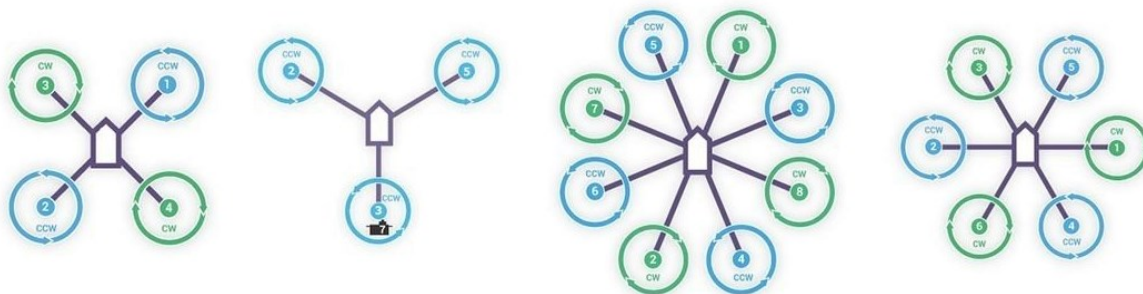


Obr. 1 Konstruování prvního dronu Aerial Target [1]

Po úspěšném testu Aerial Target rostl zájem o konstrukci a vývoj dronů. Během první světové války byly vyvinuty drony, které byly schopny urazit až 80km, přičemž mohly unést až 450kg, a to rychlostí, která se blížila 150km/h. Drony v první světové válce ještě nebyly úplně vhodné pro boj, ale byly využívány na pořizování leteckých snímků, které sloužily hlavně ke zjištění pozice a zázemí nepřítele. A právě pro pořizování leteckých snímků jsou drony ve vojenství dodnes nejčastěji využívány. [2]

## 1.2 Konstrukční řešení dronů

Dnes již existuje velká řada možností, jak mohou být drony zkonstruovány, a proto může nastat situace, kdy jsou drony pojmenovávány špatně. Dělení přitom není vůbec složité. Správné obecné pojmenování pro dron, který má na jednom ze svých ramen jednu vrtuli je koptéra. Koptéry se dělí na další podskupiny tím způsobem, že ke slovu koptéra stačí přidat označení podle počtu vrtulí, nebo ramen. Začíná se na třech vrtulích a takové drony se označují slovem trikoptéra, drony se čtyřmi vrtulemi se označují názvem kvadrokoptéra, se šesti vrtulemi hexakoptéra a poslední podskupinou koptér jsou drony, které mají až 8 vrtulí a jsou označeny názvem octokoptéra. [3]



Obr. 2 Schematicky znázorněné skupiny „koptér“ [3]

Další skupina dronů jsou koaxiální koptéry. Jsou to drony, které mají na jednom rameni dvě protilehlé vrtule. Jejich značení je v první části písmenem Y, X, nebo H, kde tvar písmene s troškou představitivosti znázorňuje základní tvar dronu. Za jedno z uvedených písmen se pak píše číslice, která nám udává počet vrtulí dronu, takže se můžeme setkat s názvy jako je např. Koaxial X8 znázorněný na obr. 4. [3]



Obr. 3 Konstrukční řešení dronu nesoucí označení „koaxial X8“ [4]

### 1.2.1 Trikopty

Trikopty mají tři rotory umístěné na ramenech, které mezi sebou svírají  $120^\circ$ . Základní rozdíl trikopty od ostatních kopty je lichý počet ramen, to s sebou nese jak výhody, tak nevýhody. Jedna ze zásadních výhod trikopty je celkově rychlejší reakce dronu na jednotlivé manévry oproti jiným konstrukčním řešením, toho je hojně využíváno u dronů závodních. Jednou z nevýhod trikopty je to, že musí mít na zadním rameni servomotor, pomocí kterého je možné natáčet vrtuli a tím pádem je umožněno otáčení dronu. Právě kvůli pohyblivému servomotoru nemůže být konstrukce trikopty zcela pevná, takže pevnost konstrukce není tak vysoká jako u ostatních kopty. Trikopty jsou tudíž náchylnější proti nárazům. Za další z nevýhod se dá považovat celkově složitější konstrukce a také nutnost použití základní desky, která trikopty podporuje.[5]

### 1.2.2 Kvadrokopty

Kvadrokopty jsou jednoznačně nejrozšířenější skupina kopty, to je nejspíš zapříčiněno vyvážením základních vlastností, kterými jsou obratnost a stabilita dronu. To zdaleka nejsou všechny výhody, které s sebou tohle konstrukční řešení nese. Kvadrokopty jsou vybaveny čtyřmi rotory, z nichž jsou dva levotočivé a dva pravotočivé. Ovládání kopty je pak umožněno pouze změnou otáček na jednotlivých rotorech. Rotory jsou pevně uloženy a díky tomu může být celá konstrukce kopty tuhá, bez pohyblivých částic. Tento fakt je jedna z dalších velkých výhod kvadrokopty. [6]

### 1.2.3 Hexakopty a octokopty

Tyto dvě podskupiny kopty jsou typické kruhovým uspořádáním rotorů. Při vyšším počtu rotorů roste stabilita a tah dronu, na druhou stranu klesá jeho mrštnost. To znamená, že díky tomuto konstrukčnímu řešení mohou drony vystoupat do vyšší výšky, unést těžší předměty, nebo létat stabilně i při vyšší rychlosti větru. Pokud je na tyto typy dronů napojena kamera pomocí gimbalu, můžeme získat perfektně stabilní záběry. [6][7]

### 1.2.4 Koaxiální kopty

Jak jsem již zmiňoval koaxiální kopty mají na jednom rameni dva rotory, které se otáčejí opačným směrem a tím dochází k vzájemnému rušení točivých momentů. Jednou z hlavních výhod koaxiálních kopty je nižší hmotnost kvůli nižšímu počtu ramen. Existují také konstrukce, kdy je dron vybaven pouze dvěma rotory v jedné vertikální ose. Kvůli

turbulentní oblasti proudění vzduchu, ve které se nachází spodní rotory, je účinnost těchto rotorů nižší, tato skutečnost je jednou z hlavních nevýhod koaxiálních koptér.

### 1.3 Dělení dronů podle použití

Drony se dnes používají pro velkou škálu aplikací a nové možnosti využití dronů stále přibývají. Jejich použití se liší podle mnoha faktorů jako je např. cena, velikost, kamera, rychlost, vzdálenost doletu, nebo třeba nosnost.

#### 1.3.1 Hobby drony

Hobby drony, nebo také toy drony se řadí do levné cenové kategorie, která míří hlavně na lidi, kteří nemají s drony velkou zkušenost. Jejich cena začíná na pár stovkách korun a řádově končí na několika tisících korun. Hobby drony nenabízí několikakilometrový dolet, nebo výdrž baterie desítek minut, za to ale mohou nabídnout spoustu zábavy za minimální investice. Tato kategorie je díky cenové dostupnosti velmi populární a nabízí velkou škálu podskupin, ze kterých si vybere opravdu každý. Drony bývají často vybaveny pomocnými systémy, jako jsou např. automatický start, nebo automatický návrat na místo vzletu, aby začátečníkům ulehčily jejich první pilotní zkušenosti. [8]

#### 1.3.2 Závodní drony

Závodní drony, nebo také FPV drony jsou hodně specifická skupina dronů. Jejich konstrukce a součástky jsou určeny k jediné činnosti, a to je závod. Mezi hlavní vybavení závodních dronů patří pevný a lehký rám často z kompozitních materiálů, výkonný motor a kamera. Mezi základní vybavení pilotů závodních dronů patří také FPV brýle, které umožňují v reálném čase sledovat obraz z kamery dronů, a tím ulehčí pilotovi manévrování mezi překážkami, kterých je na závodních okruzích dostatek. Rychlost, kterou se tyto drony pohybují, přesahuje i 200 km/h, takže zvládat manévrovat s takovým dronem chce opravdu hodně zkušeností. Jejich cena se pohybuje od několika tisíc korun do desítek tisíc korun. [9] [10]

Závody s drony se pořádají po celém světě a jsou čím dál více oblíbené. Mezi nejprestižnější závody na světě patří Drone champions league, kde je český tým nesoucí název Rotorama jedním z nejúspěšnějších. [10]

### 1.3.3 Spotřebitelské drony

Spotřebitelské, nebo civilní drony opět nabízí nespočet využití a podskupin, ovšem jednou z nejpůvodnějších a nejvíce se rozvíjejících odvětví jsou drony vybaveny kamerou, které umožňují pořizování atraktivních záběrů a fotografií. Předním výrobcem těchto dronů je DJI, který u svých modelů slibuje vysokou kvalitu pořízených snímků, ale např. i několikakilometrový dolet dronu. Firem vyvíjejících drony k pořizování videí přibývá, takže svůj dron již představila řada velkých firem, mezi které patří třeba GoPro, nebo Xiaomi. Cenový rozsah těchto dronů bývá od několika tisíc korun až po stovky tisíc. [11]

Ovšem aplikace dronů začínají být více rozmanité a konkrétnější, např. Boeing představil nákladní dron s nosností přes 230kg, který by v budoucnu mohl sloužit lidem jako „taxi dron“. Společnost DJI vyvinula práškovací dron, který nachází své uplatnění v zemědělství. Lotyšský výrobce Aeronex vyvinul dron, který je ze země připojen na hadici z hasičského vozu a umožňuje hasit požár až z výšky 100m, navíc při využití napájení připojené skrze kabel k baterii automobilu může dron létat prakticky neomezeně dlouhou dobu a díky výkonným motorům dokáže unést dospělého člověka. Ceny těchto dronů se mohou pohybovat i v řádech milionů korun. [12]



Obr. 4 Práškovací dron DJI Agras MG-1S [13]



### 1.3.4 Vojenské drony

Vojenské drony se dají rozdělit do dvou základních skupin, a to na drony bojové a drony špionážní.

#### Špionážní drony

Špionážní drony byly vyvinuty první, jejich hlavní cíl je mapovat pohyb a zázemí nepřítele, bez ohrožení lidských životů. Špionážní drony mohou být napojeny na orbitální družice, takže pilot dronu může být vzdálený i tisíce kilometrů od samotného dronu. Existuje nepřeberné množství různých druhů špionážních dronů, např. Británie vyvíjí miniaturní špionážní dron, který svou velikostí a tvarem připomíná vážku, navíc se chlubí tím, že dron se díky svým senzorům a speciálním křídly dokáže neomylně vyhnout jakékoliv překážce. USA vlastní drony nesoucí název RQ-4 Global Hawk, které patří mezi špičku špionážních dronů, jsou to obří letouny, které mohou zmapovat až 100 000 km<sup>2</sup> za den, mají rozpětí křídel 35 m, hmotnost 3,8 tun, dolet přes 22 000 km. Vývoj dronu RQ-4 stál přes 3,5 miliardy amerických dolarů. [14] [15]



Obr. 5 Dron Global Hawk RQ-4 [16]

#### Bojové drony

Bojové drony dnes již provozuje mnoho zemí, jako je např. USA, Izrael, Čína, Velká Británie, Irák a mnoho dalších. Již od počátku století dokáží drony z USA pomocí kamery s vysokým rozlišením identifikovat obličejové rysy a zaměřit konkrétní cíl. Takto zaměřený cíl již automat nespustí z očí a dokáže jej zasáhnout naváděnou strelou, i když se cíl bude pohybovat stokilometrovou rychlostí. První velký útok dronů byl zahájen v roce 2002 na vůdce al-Káidy, při útoku byly použity americké drony MQ-1B Predator. [17]

## 1.4 Vývoj řízení dronů

Vůbec první drony jako byl již zmíněný Aerial Target, nebo např. Aerial torpedo, byly řízeny pomocí gyroskopického autopilota. Tento autopilot byl schopný udržovat pouze přímočarý ustálený let, přičemž se neřešila skutečnost, že by se dron měl někdy vrátit zpátky na místo vzletu. Takto řízené drony byly především určeny na dopravení náloží na nepřátelské území. Drony byly seřízeny tak, aby při určitém počtu otáček motoru byly povoleny šrouby mezi křídlem a trupem. To vedlo k tomu, že se dron prakticky rozpadnul a trup dronu spolu s náloží padal na předem vypočtené místo. Pokud dron urazil vzdálenost 50 km, byla přesnost shozené nálože cca 3,2 km od středu cílové plochy.

Mezi roky 1934 – 1943 bylo ve Velké Británii vyrobeno 420 kusů dronů nesoucí název Fairey Queen, které byly jako první plně rádiově řízené. Rádiové řízení již umožňovalo korekci rychlosti, výšky a směru letu. Tyto drony byly určeny pro výcvik střelců.

Až donedávna představovaly drony spíše komplikovaná letadla, nebo vrtulníky, ale ani zdaleka nepřipomínaly jakýkoliv druh multikoptéry. Důvod je prostý, multikoptéry totiž nedokáží létat bez použití počítače, který neustále koriguje rychlosti otáček jednotlivých motorů tak, aby se dron nezřítíl. Tento počítač na palubě dronu je řídicí jednotka vybavená akcelerometry a gyroskopy, bez kterého by byl koncept dronu neuskutečnitelný. Aby se dron jen nevznášel ve vzduchu, musí být řídicí jednotka schopna dron ovládat pomocí pokynů z vysílačky v ruce pilota. K ovládnutí multikoptér jakýmkoliv směrem stačí pouze správně změnit otáčky jednotlivých vrtulí.

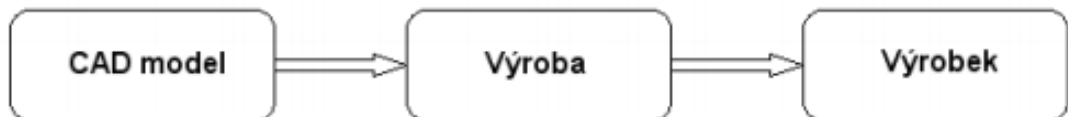
Přenos signálu z vysílačky k dronu je zajištěn pomocí rádiových vln. Pro komerčně vyráběné drony je ideální řídicí signál o frekvenci 2,4GHz a 5,8 GHz pro přenos videa. Frekvence vln používané pro řízení dronů mají velmi podobné vlastnosti jako vlny viditelného světla, takže se nejlépe šíří tam, kam vidíme. To v praxi znamená, že signál mezi dronem a vysílačkou dokáže zeslabit jakákoliv překážka, nebo např. změna vlhkosti vzduchu (mlha apod.). Tento signál může být dále rušen WiFi routery, mobilními sítěmi, nebo bezdrátovým internetem.

V Česku prakticky neexistuje jediné místo, kde by nedocházelo k rušení signálu, takže bezpečná vzdálenost bezproblémového řízení dronu může být často mnohem kratší, než udává výrobce. V praxi to znamená, že např. u dronů Mavic Pro určených pro Evropu je výrobcem udávaný maximální dolet 4 km, ale v běžné zástavbě nebude dolet dronu vyšší než 2 km a dle některých zdrojů je bezpečná vzdálenost pro řízení tohoto dronu pouze 1 km.

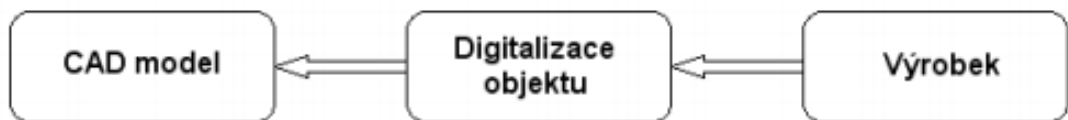
## 2 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ

U reverzního inženýrství, nebo také zpětného inženýrství, jde především o to odkrýt princip a fungování zkoumaného předmětu.

### Klasický výrobní proces



### Proces Reverzního inženýrství



Obr. 6 Srovnání reverzního inženýrství s klasickým výrobním postupem [18]

### 2.1 Význam reverzního inženýrství

Jedním z důvodů, proč reverzní inženýrství vzniklo, je vyrobit podobný nebo stejně fungující předmět. Využívá se ale také kvůli odhalení nových technologií a materiálů v případě konkurenčních firem. Příkladem může být výrobce pneumatik, který nakoupí pneumatiky od konkurenčních firem, ty rozebere a zkoumá. Tím zjistí, jaké materiály a technologie využívá jeho konkurence a následně tak může vyrobit podobnou pneumatiku, která bude mít lepší vlastnosti. Dalším příkladem použití reverzního inženýrství může být např. obnovení výkresové dokumentace, kdy danou součástku můžeme naskenovat, převést do digitalizované podoby a následně z ní vytvořit výkresovou dokumentaci. Reverzní inženýrství se také využívá v oboru rekonstrukce. Například zlomený obráběcí nástroj, který se provizorně slepí, naskenuje a provede se rekonstrukce. Jestliže se na nástroji vyskytuje zdeformovaná oblast, dá se v počítači domodelovat, nebo u symetrických dílů převzít tvar pomocí zrcadlení. [19]

### 3 3D SKENOVÁNÍ

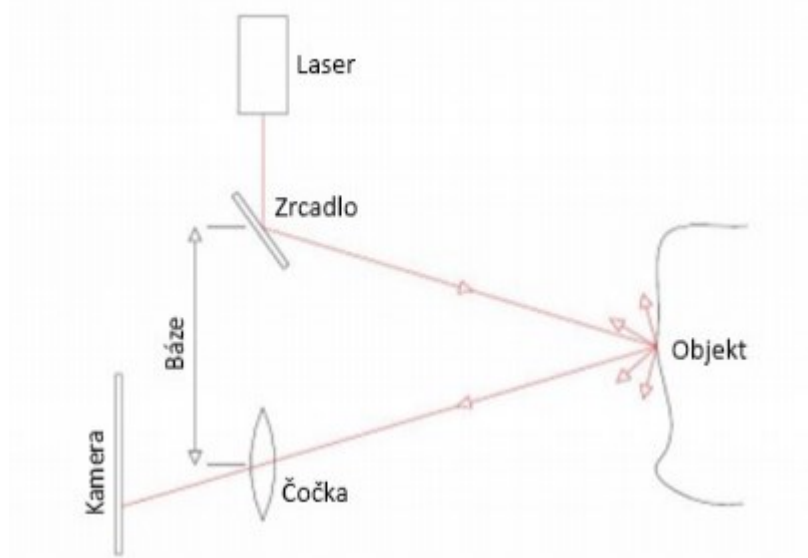
3D skenování je činnost, při které se realita přenáší do počítače a vytváří se její digitální obraz za pomoci 3D skeneru. Je to velmi zajímavé řešení, jak transformovat objekt z reálného světa do počítačového modelu. 3D skenování jde ruku v ruce s 3D tiskem, jedná se vlastně o obrácený proces, který velice často 3D tisku předchází. [20]

#### 3.1 Technologie 3D skenerů

Skenování lze rozdělit na 3 základní kategorie a to laserové skenování, optické skenování a mechanické skenování. Tyto skenery se liší technologií, kterou využívají pro tvorbu digitálního modelu z reálného objektu.

##### 3.1.1 Laserové skenování 3D objektů

3D laserové skenování je technologie, u které je fyzický tvar objektu převeden na digitální za pomoci tzv. triangulace. Laserová triangulace je stereoskopická technika, u které se vzdálenost objektu vypočítá pomocí rozkmitávaného laserového paprsku, který je promítán na snímané těleso, tento paprsek je sledován pomocí kamer. Kamery musí být umístěny ve známé poloze vůči skeneru a následně lze pomocí trigonometrie určit prostorové souřadnice skenovaného modelu. Takto změřené body tvoří tzv. mračno bodů, které je následně převedeno do počítače, kde se nám vykreslí skenovaný objekt. [20]



Obr. 7 Princip 3D laserového skenování [21]

### 3.1.2 Optické skenování 3D objektů

U optického skenování se nejdříve skenovaný objekt umístí na pevnou podložku nebo polohovací zařízení (otočný stolek) a nasnímá se z několika úhlů. Při každém snímání se model v podstatě vyfotí a data se uloží. Když je objekt nasnímaný ze všech úhlů pohledu, data se zpracují a pomocí softwaru, který využívá princip aproximace, se vytvoří digitalizovaný model.



Obr. 8 Princip optického skenování skenerem Atos [22]

Jedna z možností jak vytvořit digitální obraz skenovaného dílu, je na skenovaný objekt umístit několik orientačních bodů tzv. centrovacích terčičků. Pro co nejpřesnější napojení jednotlivých snímků, je potřebné při každém skenování nasnímat alespoň 3 centrovací terčičky z předchozího snímku. Další z možností je využít software, který využívá tzv. best-fit. Tato metoda se používá u kontroly kvality dílu, kdy se porovnává model vytvořený konstruktérem např. v programu Catia a naskenovaný 3D reálný díl. Pro finální porovnání je důležité ustavení 3D modelu a skenovaného dílu tzv. best-fit. Ten lze provést na libovolně zvolenou plochu či entitu objektu. Výstupem měření je pak barevná mapa odchylek ve 3D oblasti, kde lze jasně rozpoznat odchylky reálného dílu vůči datům, např. u výrobků jde o otřepty či povrchové vady. U této metody není nutné využívat centrovací terčičky. Problém je u lesklých povrchů, které se nedají optickým skenerem nasnímat. Používají se proto speciální nátěry a postřiky, které povrch zmatní, ne vždy lze ale toto řešení využít. [23]

### 3.1.3 Mechanické skenování 3D objektů

U mechanické metody skenování se využívá přímého kontaktu měřeného objektu se senzorem, kterým bývá často sonda s kuličkou, která je připojena na mechanické rameno. Snímá se poloha a natočení v jednotlivých kloubech mechanismu. Výsledkem je mračno bodů, které se dále převede na digitalizovaný model.

Mechanickou metodou měření se nedají získat informace o textuře povrchu a navíc je tato metoda velice časově náročná. Nicméně lze použít více druhů sond, čímž lze samotné měření urychlit. Dosahovaná přesnost této technologie je řádově 0,01 mm. [24]

## 3.2 Oblasti využití 3D skenerů

Protože je možné naskenovat objekty všech velikostí a tvarů, využívá se 3D skenování ve velké škále aplikací. Ve výrobním průmyslu se skenování často využívá pro inovaci nebo vývoj jednotlivých součástí např. u automobilů.

Velký rozvoj použití skenerů je i v lékařství, kde se využívá v oboru ortopedie, kdy je lékař pomocí přesně naskenovaných částí lidského těla schopný navrhnout ideálně přizpůsobené protézy. V lékařství se skenery využívají také v oboru plastické chirurgie.

Skenování se také využívá v herním a filmovém průmyslu, kde může naskenování 3D modelu značně urychlit práci grafiků a 3D návrhářů. Využívá se i při tvorbě speciálních efektů.

3D skenery ulehčují práci módních návrhářů, archeologů, ale také jsou velkou pomocí v oboru pojišťovnictví, nebo např. v kriminalistice, kde umožní podrobné studie místa činu. [25] [42]

## 4 3D TISK

Technologie Rapid Prototyping dnes už více známá pod pojmem 3D tisk, je technologie, která umožňuje vytvořit fyzický díl nebo celý výrobek z počítačového modelu. Hlavním důvodem, kvůli kterému jsou 3D tiskárny stále populárnější, jsou především mnohem nižší náklady na výrobu prototypů ve srovnání s ostatními výrobními technologiemi. [26]

### 4.1 Vznik Stereolitografie

Vůbec první technologie, která světu představila pojem 3D tisk, byla vynalezena v roce 1984 Charlesem Hullem. Tehdy zkoumal, že fotopolymery inkoustových tiskáren tuhnou za pomoci působení UV záření. Svůj nápad si nechal patentovat a celou technologii pojmenoval stereolitografie. Již v roce 1986 Charles Hull založil společnost s názvem 3D Systems a představil světu svoji první 3D tiskárnu nesoucí název SLA-1. [27]

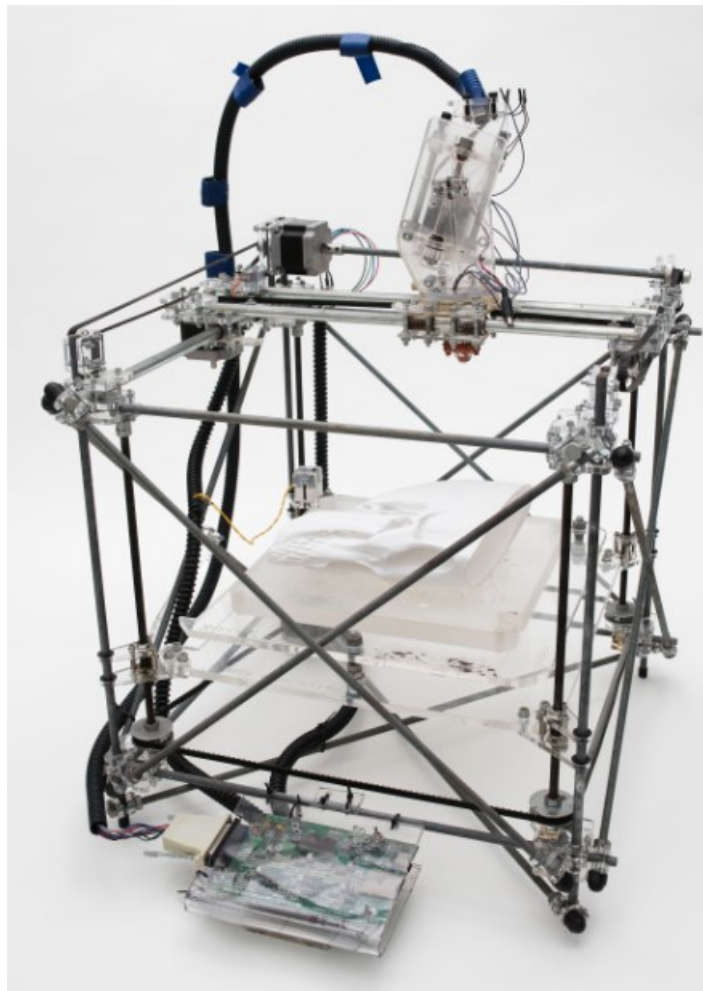


Obr. 9 Tiskárna SLA-1 [28]

### 4.2 Vývoj 3D tisku

Při vzniku první 3D tiskárny byl objeven vysoký potenciál využití této technologie. Jako první se začaly v roce 1992 vytvářet díly pro automobilový a letecký průmysl. V roce 2002

způsobila technologie 3D tisku převrat v lékařském průmyslu, když se podařilo vytisknout funkční miniaturní ledvinu, která byla následně úspěšně transplantována nemocnému zvířeti. Stále měla 3D tiskárna jednu zásadní nevýhodu a tou byla pořizovací cena, takže představa toho, že by 3D tiskárnu vlastnili lidé ve svých domácnostech, byla v nedohlednu. Tuto skutečnost se pokusil změnit Dr. Adrian Browyer. Ten přišel v roce 2005 s nápadem, vytvořit 3D tiskárnu, která by byla schopna vytisknout veškeré díly, ze kterých je zkonstruována. Svůj projekt nazval RepRap a už v roce 2008 vytvořil první tiskárnu pod názvem Darwin, která umí vytisknout většinu svých dílů. Kovové díly, které tato tiskárna tisknout neumí, jsou běžně dostupné. Takže pokud si takovou tiskárnu pořídíte, může být další jednoduše vytištěna. [29]



Obr. 10 RepRap tiskárna Darwin [30]

Tímto nápadem se inspirovalo mnoho dalších firem a dnes je možné pořídit cenově dostupné 3D tiskárny, které vznikly právě ze zmiňované platformy RepRaP. V roce 2015 byla vyhlášena soutěž na výstavě 3Dexpo, která porovnávala kvalitu cenově dostupných tiskáren,



kteřé mají pořizovací cenu od 10 000,- Kč do 100 000,- Kč. Společnou charakteristikou těchto tiskáren bylo použití nejdostupnější aditivní technologie FDM /FFF (tyto technologie budou popsány v další části této bakalářské práce). Soutěže se účastnilo 28 výrobců 3D tiskáren a z toho 3 výrobci byli z České republiky. Úkolem bylo vytisknout jednoduchý 3D model malého robota (Obr. 11), který všichni dostali chvíli před zahájením soutěže, aby neměli možnost se na soutěž jakkoliv připravit. [31]



Obr. 11 Soutěžní model [31]

Vítězem soutěže se stal polský výrobce se svoji tiskárnou Zortax M200 (obr. 4), která test podle poroty zvládla nejlépe. Pořizovací cena této tiskárny se pohybuje kolem 55 000,- Kč. [32]



Obr. 12 3D tiskárna Zortax M200 [33]

### 4.3 Technologie 3D tisku pro výrobu polymerních dílů

Princip výroby 3D modelu pomocí 3D tiskárny je možné si představit tak, že model, který chceme vyrobit je pomyslně rozřezán na tenké vrstvy. Tyto vrstvy se pak nanáší jedna po druhé, dokud nevznikne hotový model. Ve skutečnosti to není až tak jednoduché, jak se může na první pohled zdát. Pro zrealizování tohoto postupu slouží několik technologií, které mají samozřejmě své výhody i nevýhody, které je nutné zohlednit před samotnou výrobou. [34]

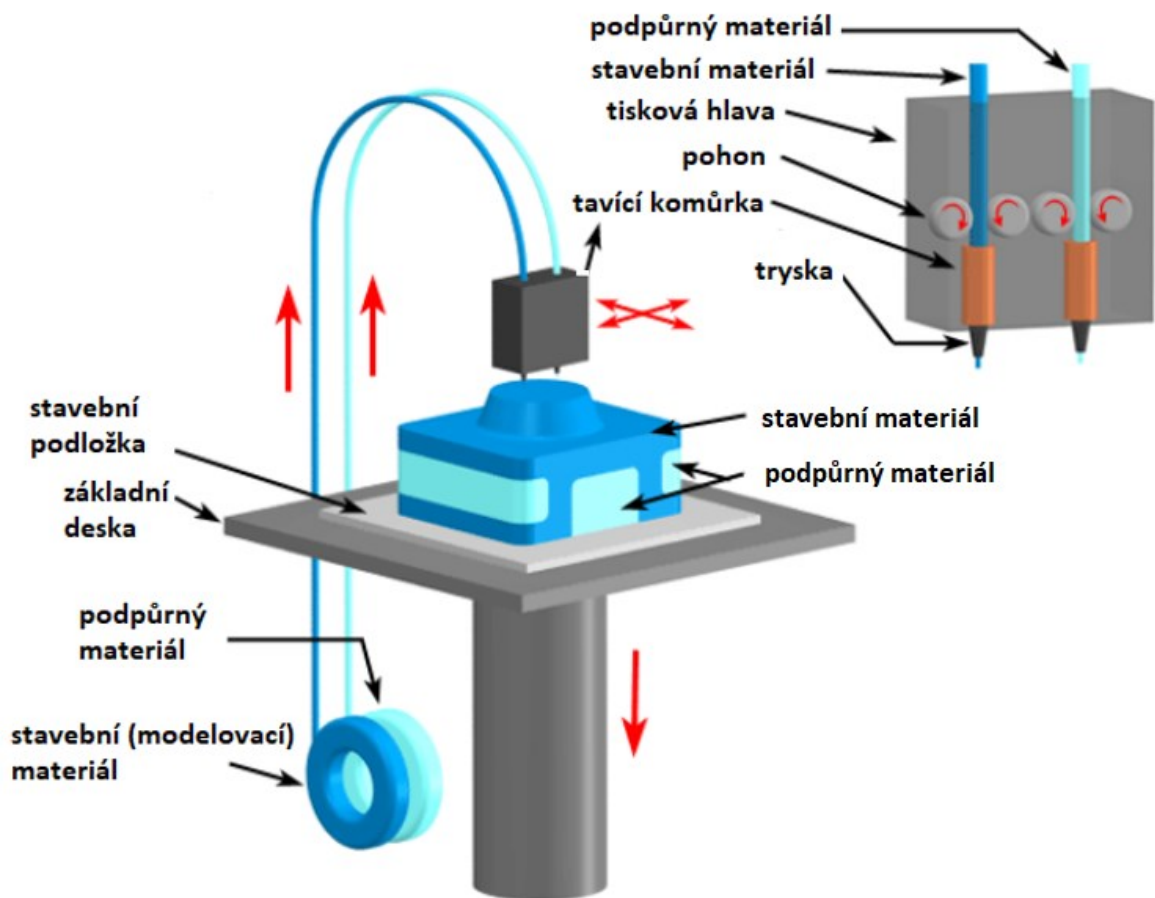
#### 4.3.1 Technologie Fused Filament Fabric a Fused Deposition Modeling

Tyto dva názvy mají stejný význam, ale název Fused Deposition Modeling (FDM) je registrovaná ochranná značka společnosti Stratasys, která ji jako první vynalezla a představila v roce 1988, takže ji ostatní výrobci nemohou používat. Jedná se o tisk funkčních modelů roztaveným plastem. V dnešní době asi nejrozšířenější metoda vytváření 3D modelů.

Nejčastěji využívané materiály této technologie jsou ABS a PLA, kdy jsou tyto materiály navinuty na cívce v podobě vlákna, nejčastěji o průměru 1,75 mm, 2,85 mm nebo 3mm a tiskárna si je postupně odebírá. Následně jsou tyto materiály roztaveny v tiskové hlavě a vytlačovány tenkou tryskou. Celá sestava se pohybuje nad tiskovým stolem, na kterém nanášené vrstvy postupně tuhnou. U průmyslových tiskáren se často používají dva materiály, z nichž jeden je modelovací a druhý je podpůrný. Cenově dostupné tiskárny, často využívají modelovací materiál zároveň i jako podpůrný. Podpůrný materiál slouží jako lešení a následně je odstraněn buď manuálně, nebo vodou. Modelovací materiál poté tvoří hotový model.

Výhodou této technologie je vytváření funkčních prototypů za mnohem nižší cenu oproti použití jiných technologií. Lze s ní vyrábět funkční díly nebo např. nerozebíratelná pohyblivá spojení (Obr. 6), která mohou obsahovat několik dílů. Další výhodou může být pořizovací cena tiskárny, ta bývá nižší ve srovnání s tiskárnami, které využívají jiné technologie pro vytváření dílců.

Hlavní nevýhodou této technologie je tloušťka nanášené vrstvy, mohl by být problém vytisknout dílce, u kterých je obzvlášť důležité detailní provedení. [35] [36]



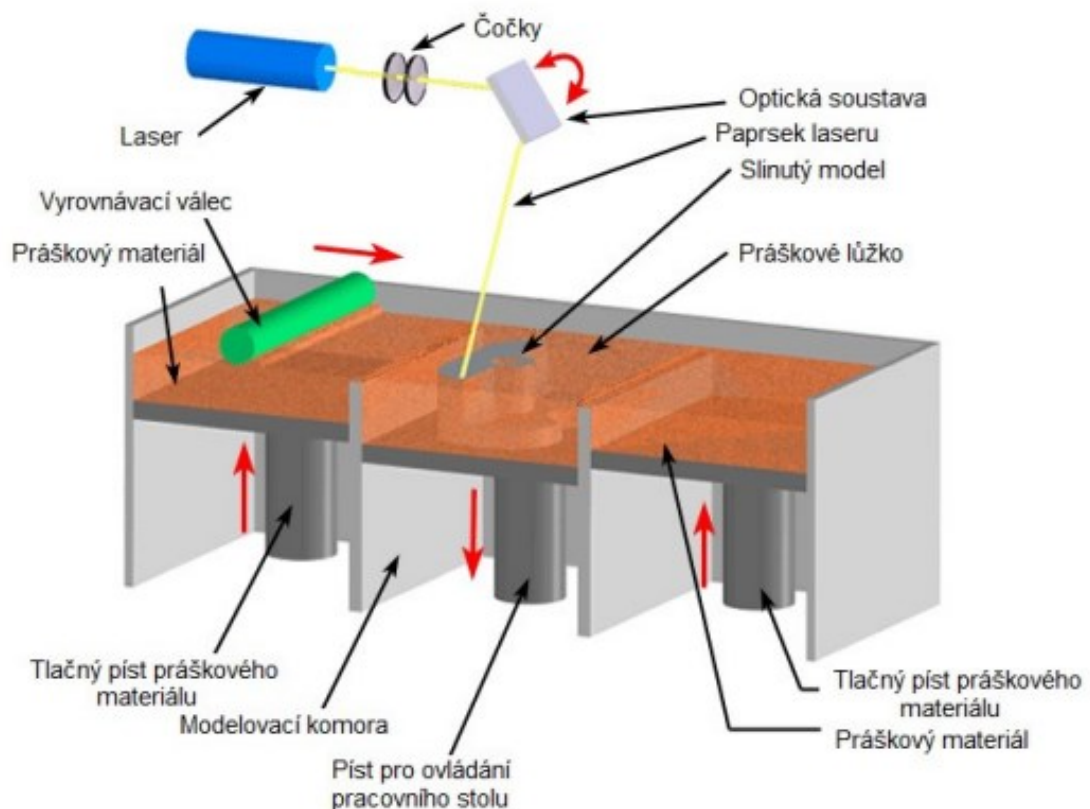
Obr. 13 Výroba modelu technologií FDM/FFF [37]

#### 4.3.2 Technologie Selective Laser Sintering (SLS)

Tato technologie byla vynalezena v osmdesátých letech minulého století vědci, kteří působili na Texaské Univerzitě v Austinu. Jedná se o technologii, která využívá selektivní spékání laserem. Funguje na principu spojování práškových hmot, které nemusí být jen z plastu, ale také třeba z kovu, skla, nylonu nebo keramiky.

Na podkladovou desku se nanese vrstva práškového materiálu a následně se nataví za pomoci působení velmi výkonného CO<sub>2</sub> laseru. Tím dochází ke spékání materiálu, ale jen v požadovaném místě. Tento proces se opakuje až do dokončení výrobku. Okolní materiál zůstává nespečen a slouží jako podpůrný.

Výhodou této technologie je vysoká pevnost a přesnost vytištěných dílů, také velké množství materiálů, které lze pro tisk použít. Tato metoda má veliké uplatnění při výrobě prototypových vstřikovacích forem a velmi tvarově složitých výrobků. Nevýhoda této technologie může být nižší kvalita povrchu ve srovnání s ostatními technologiemi, velikost samotného zařízení a jeho energetická náročnost. [38]



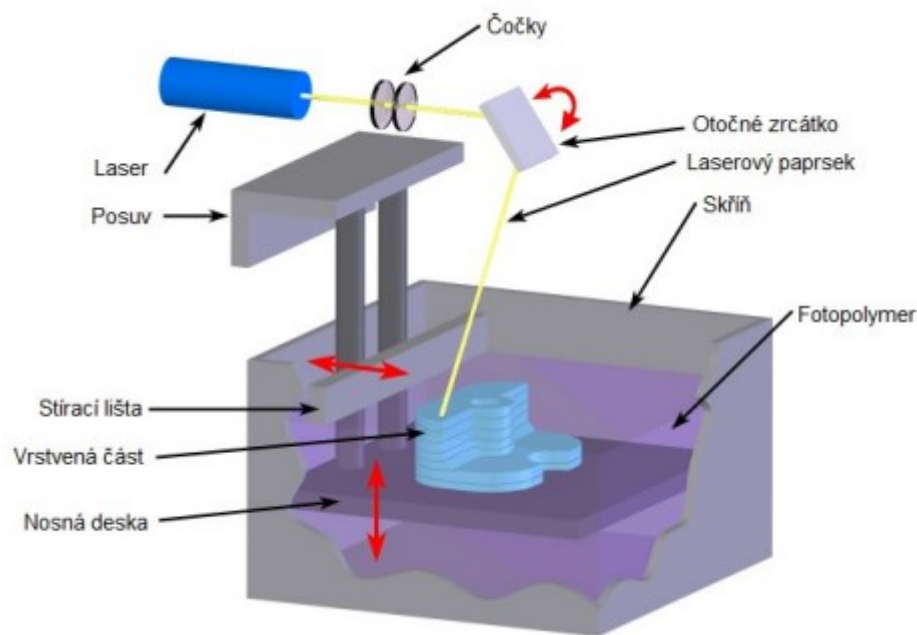
Obr. 14 Výroba modelu technologií SLS [38]

#### 4.3.3 Technologie Stereolitography (SLA)

Od roku 1984, kdy byla stereolitografie objevena, se využívá ve velké míře při výrobě 3D modelu za pomoci ultrafialového laseru, který působí na tenkou vrstvu tekutého fotocitlivého polymeru.

Tato metoda je velice podobná metodě SLS. Model vzniká v nádobě, ve které je fotopolymer a nosná deska, která se v nádobě pohybuje. Paprsek generovaný laserem působí pouze na místa, kde chceme fotopolymer vytvrdit. Po vytvrzení první vrstvy nosná deska klesne o tloušťku jedné vrstvy níže pod hladinu fotopolymeru a proces vytvrzování se opakuje. Před každým dalším působením laseru na polymer je nutné přejet hladinu tzv. stěračem, aby se zabránilo vzniku nepřesností. Po vytvrzení všech vrstev vzniká 3D model, u složitějších modelů je nutné použít dočasné podpory, které se po vyhotovení modelu odstraní.

Mezi výhody SLA technologie je možnost tvorby velkých a složitých modelů, které mají dobré fyzikální vlastnosti. Proto se touto metodou dají vyrobit např. formy pro vstříkování polymerů. Hlavní nevýhodou této technologie je omezené množství výběru materiálů a také vysoká pořizovací cena tiskárny. [39] [40]



Obr. 15 Výroba modelu technologií SLA [38]

#### 4.3.4 Technologie PolyJet

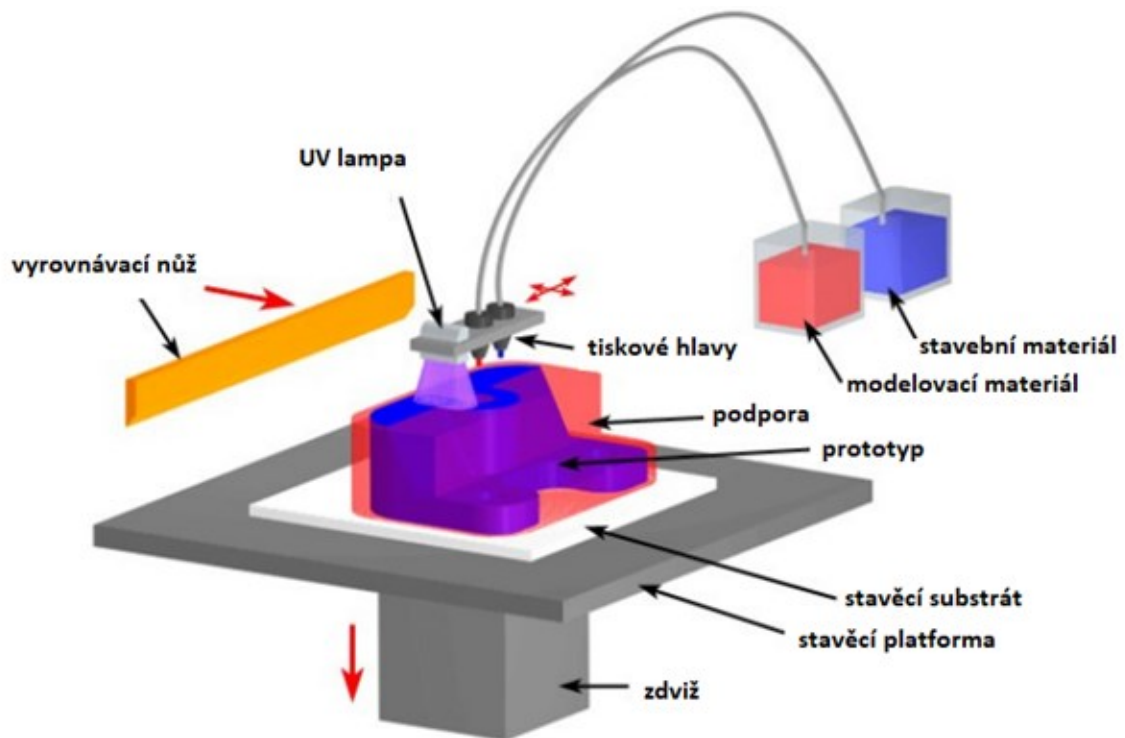
Technologie PolyJet byla představena v roce 2000 firmou Objet. Jedná se o tryskání fotopolymerních materiálů. Od ostatních technologií se liší tím, že se může současně používat více druhů polymerů.

Při výrobě modelu se využívá dvou a více druhů fotopolymerů, které jsou tryskány na nosnou podložku ve vrstvách. Tyto vrstvy dosahují minimální tloušťky 0,016 mm a jsou ihned po nanesení vytvrzeny za pomoci ultrafialového záření. Vzhledem k tomu, že je model vytvrzován zároveň s modelováním, hotový výrobek je ihned připraven k použití. Podpůrný materiál, který se využívá pro technologii PolyJet, je na bázi gelu a po zhotovení výrobku se jednoduše odstraní.

Hlavní výhodou technologie PolyJet je v možnosti použití různých materiálů současně. To znamená, že se dají kombinovat materiály s různými fyzikálními vlastnostmi, nebo třeba materiály různě barevné. PolyJet technologie je velmi přesná, díky malé vrstvě nanášeného fotopolymeru je možné tvořit složité součástky s velmi hladkým povrchem. Použití této technologie je vhodné pro součástky, u kterých je kladen důraz na detailní provedení.

Hlavní výhodou technologie PolyJet je v možnosti použití různých materiálů současně. To znamená, že se dají kombinovat materiály s různými fyzikálními vlastnostmi, nebo třeba materiály různě barevné. PolyJet technologie je velmi přesná, díky malé vrstvě nanášeného

fotopolymeru je možné tvořit složité součástky s velmi hladkým povrchem. Použití této technologie je vhodné pro součástky, u kterých je kladen důraz na detailní provedení. Nevýhodou technologie PolyJet je, stejně jako u technologie SLA, nemožnost výběru z velkého množství polymerů a vysoká pořizovací cena tiskárny. [40] [41] [42]



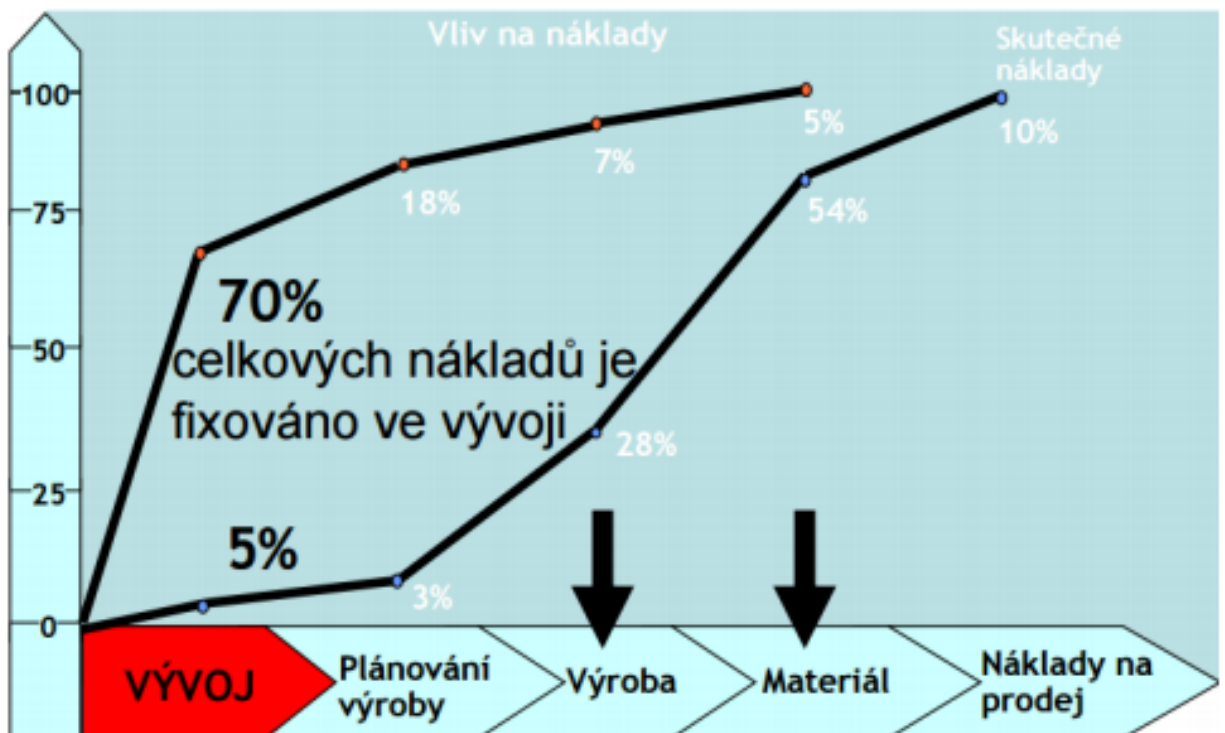
Obr. 16 Výroba modelu technologií PolyJet [40]



Obr. 17 Výrobky vytištěny metodou PolyJet [42]

## 5 CAE SYSTÉMY

Zkratka CAE z anglického Computer Aided Engineering v překladu znamená počítačem podporované inženýrství. Jedná se o softwary, díky kterým je možné simulovat např. výrobní procesy, nebo konkrétní aplikace určitých výrobků. CAE systémy jsou díky své oblibě neustále vyvíjeny. Díky tomu lze s jejich pomocí získávat čím dál více cenných informací. Konstrukterům po celém světě pomáhají lépe pochopit a předpovídat problémy, které mohou během výroby, nebo dané aplikaci výrobku nastat. Jednou z dalších výhod simulací je možnost vyzkoušet více různých návrhů výrobků před vyrobením prvního prototypu. Tato skutečnost vede hlavně ke snížení nákladů spojené s výrobou a testováním nových prototypů. Některé zdroje uvádí, že ve vývoji může být fixováno až 70 % celkových nákladů na výrobu. Právě tyto náklady nám CAE softwary mohou pomoci snížit. [43]

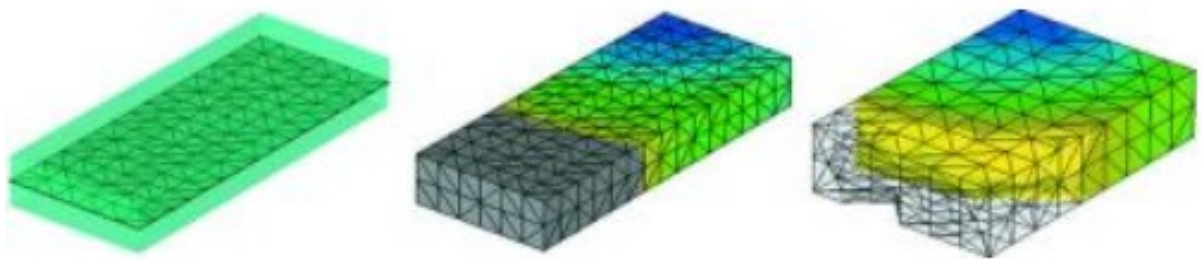


Obr. 18 Vliv jednotlivých etap výroby na růst nákladů [43]

### 5.1 Postup nastavení analýzy

Prvním krokem při nastavení analýz je zpravidla vytvoření vhodné sítě na výrobku. V každém softwaru existují různé typy sítí, které je možné na daný výrobek aplikovat. Např. v softwaru MoldFlow, který je určený na simulace vstřikovacího procesu, existují tři druhy sítí. Tyto sítě se nazývají Midplane, Dual Domain a 3D síť. Použitý typ sítě značně

ovlivňuje výsledky analýzy a také dobu výpočtu analýzy. U tvarově složitých dílů a u výrobků které mají tlusté stěny, nebo velké změny v tvaru a průřezu je vhodné použít 3D síť, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. U tvarově jednoduchých dílů stačí použití Dual Domain, nebo Midplane síť pro získání přesných výsledků. Po vytvoření sítě je nutné ji zkontrolovat a případně opravit chyby v síti. [43]



Obr. 19 Druhy sítí (z leva Midplane, Dual Domain, 3D síť) [43]

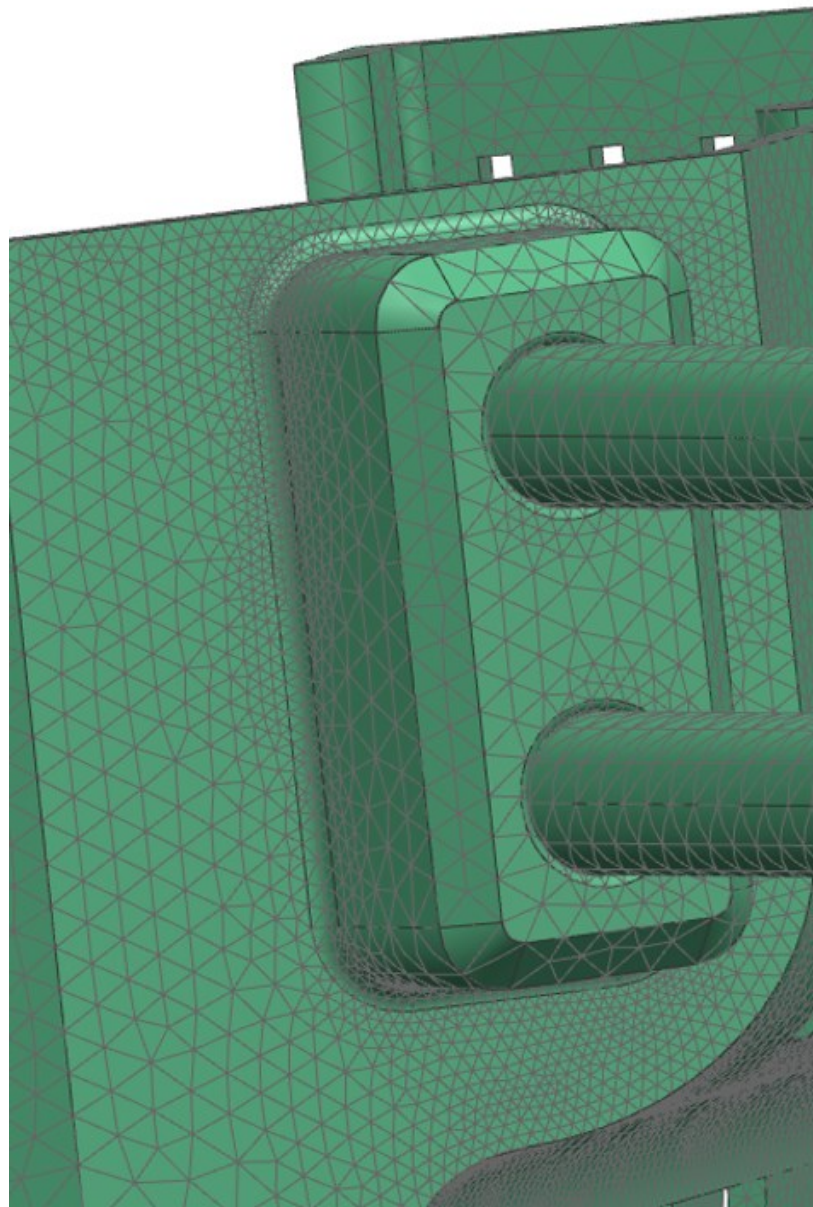
Po správném vytvoření 3D sítě je vhodné nadefinovat materiál k jednotlivým dílům. Softwary většinou nabízí širokou škálu předem nadefinovaných vlastností různých materiálů. Mimo jiné umožňují i nadefinování vlastností vlastních materiálů.

V případě simulací mechanického namáhání následuje definování vazeb a zatížení dílu. Softwary nabízí velké množství předdefinovaných vazeb, které zpravidla blokují pohyb daného dílu v jednotlivých osách, nebo zamezují otáčení dílu. Mimo tyto základní vazby mohou softwary nabízet např. vazbu symetrie, která je velice užitečná při práci se symetrickým dílem. Použití vazby symetrie významně zkrátí dobu výpočtu, při zjištění stejných výsledků. Po nastavení vazeb následuje nadefinování zatížení, které na výrobek působí. Software i zde nabízí velkou škálu možností zatížení, mezi které patří např. gravitační síla, akcelerace, nebo moment.

Po nastavení okrajových podmínek lze spustit výpočet analýzy a po dokončení výpočtu nám software zobrazí výsledky analýzy, jako jsou deformace, nebo napětí. U získaných výsledků lze většinou vybrat, jestli se získaná hodnota týká pouze jednoho uzlu sítě, nebo celého elementu. Získané výsledky jsou vždy uvedeny s určitou chybou, aby tato chyba byla co nejmenší, musí být snížena velikost elementů vytvořené sítě. Problémem je to, že čím nižší je chyba a velikost sítě, tím značně narůstá doba, po kterou je simulace softwarem řešena. Některé softwary umožňují snížit velikost elementů pouze v místech, kde vzniká nějaké



napětí, nebo deformace. Ukázka lokálního zpřesnění sítě, provedené v softwaru NX je zobrazena na následujícím obrázku. Tato funkce je velmi výhodná, protože umožňuje získání výsledků s minimální chybou při nižší době výpočtu, než kdyby byl celý model vysítován sítí s malými elementy. [44]



Obr. 20 Lokální zmenšení elementů 3D sítě v softwaru NX

## 6 AKČNÍ KAMERY

Akční kamery, někdy také označované jako sportovní, nebo outdoorové, jsou kamery většinou velmi malých rozměrů, které slouží především sportovcům k zachycení jejich sportovních aktivit. Díky malým rozměrům a velké škále příslušenství lze kameru připevnit prakticky kamkoliv, ať už na řídítka u kola, přilbu, nebo díky speciálním popruhům na hrud', nebo čelo kameramana.



Obr. 21 Akční kamera GoPro Hero 7 [45]

### 6.1 Parametry akčních kamer

Díky popularitě akčních snímků dnes již existuje velké množství výrobců, kteří se akčními kamerami zabývají. Mezi přední výrobce patří GoPro, Xiaomi, Lamax, nebo Niceboy. Výrobci se snaží v podstatě o to vyvíjet kamery, které jsou schopny zachycovat co nejvyšší možnou kvalitu stabilního obrazu, při zachování minimálních možných rozměrů a přijatelné ceny. Základní parametry, které od sebe dělí jednotlivé akční kamery, jsou uvedeny níže.

#### 6.1.1 Rozlišení a FPS

Jedním ze základních parametrů, který je uváděn u každé akční kamery, je rozlišení. Rozlišení nám udává, kolik pixelů je zařízení schopno vykreslit v horizontálním a vertikálním směru. Existuje několik druhů rozlišení, mezi ty nejznámější patří 4K (3840 x 2160 pixelů), Full HD (1920 x 1080 pixelů), nebo HD (1600 x 900 pixelů).

Může se tedy zdát, že čím vyšší rozlišení kamera má, tím vyšší je kvalita pořízeného videa, ve skutečnosti tomu tak není a prodejci akčních kamer toho umí velice dobře zneužít při propagaci svých kamer. Výsledná kvalita obrazu totiž nezáleží jen na samotném rozlišení, ale také i na neméně důležitém parametru kterým je FPS.

FPS (z anglického frames per second) znamená tzv. snímkovou frekvenci. Tento parametr udává, kolik snímků je kamera schopná udělat za vteřinu. Snímková frekvence je velice důležitá, protože čím více snímků za vteřinu je kamera schopná zachytit, tím plynulejší se nám bude jevit výsledné video. Aby lidské oko vnímalo jednotlivé snímky jako video, a nikoliv jako jednotlivé fotky, musí jich vidět alespoň 24 za sekundu a při 60 snímcích za sekundu už můžeme mluvit o plynulém videu. Hodnota FPS hraje důležitou roli i při pořizování rychlých záběrů, např. natáčení jízdy na kole, kde je nutné mít vyšší hodnotu FPS, aby se získané video nejevilo jako sekané. Některé kamery jsou při určitém rozlišení schopny zaznamenávat snímky rychlostí až 240 FPS, takto vysoká hodnota FPS lze následně využít pro tvorbu plynulých zpomalených záběrů.

Proto kvalita videa nezáleží jen na samotném rozlišení, ale také na tom kolik snímků za vteřinu je kamera schopná zaznamenat při daném rozlišení. Výrobci kamer se často chlubí tím, že jejich kamera je schopná točit v rozlišení 4K, jenže už se nechlubí tím, že toto rozlišení zvládne kamera pouze při 25 FPS. Takže pořizené video z takové kamery bude mít sice vysoké rozlišení, ale jednotlivé snímky na sebe nebudou navazovat dostatečně rychle a výsledné video se bude jevit jako sekané. Mnohem lépe bude působit video natočené v rozlišení Full HD a rychlostí snímání 120 FPS. [46]

### 6.1.2 Stabilizace

U akčních kamer existují dva způsoby stabilizace videa a fotografií. Prvním způsobem je optická stabilizace pomocí gyroskopu značená OIS a druhým způsobem je stabilizace elektronická značená EIS.

#### Optická stabilizace OIS

Při tomto druhu stabilizace je obraz stabilizován změnou optické dráhy senzoru. Tato změna probíhá v reálném čase, takže stabilizací nedochází k degradaci výsledného obrazu. Kamera v sobě má vestavěný gyroskopický senzor, díky kterému se pohybuje objektiv, který vyrovnává otřesy kamery.

Mezi hlavní výhody stabilizace OIS patří možnost použití stabilizace pro všechny rozlišení a FPS, kterými kamera disponuje. Mezi nevýhody patří možné zmenšení úhlu záběru kamery a také nižší výdrž baterie, která musí část energie využít pro pohon gyroskopu. Optická stabilizace funguje nejlépe, pokud je kamera upevněna k pevnému bodu jako může být např. helma, nebo říditka. [47]

### Elektronická stabilizace EIS

U elektronické stabilizace je nejprve optický signál převeden na digitální. Tento převod je možný díky CCD (z anglického Charge Coupled Device). CCD je elektronická součástka, která je složená ze světelných senzorů, které jsou uspořádány do mřížky. Tyto světelné senzory zachycují optické světlo a následný obraz pro zpracování přenáší ve formě digitálních signálů. Následuje práce procesoru v EIS, který získaný snímek rozdělí na malé kousky, které porovná s předchozími snímky. Tímto způsobem je procesor schopný zjistit, zda je kamera v pohybu, popřípadě zda nedošlo k negativnímu chvění. Pokud ke chvění došlo, je nutné provést ořez obrazu a vyplnit jej do požadovaného rozlišení.

Hlavní výhodou této stabilizace je, že nezabírá prakticky žádné místo, takže kamera může mít menší rozměry. Další výhodou je minimální náročnost EIS stabilizace na spotřebu energie, takže kamera vydrží nahrávat delší dobu. Hlavní nevýhodou je, že na rozdíl od OIS nelze tuto stabilizaci použít pro všechny možnosti rozlišení kamery, protože ořez musí být vždy proveden z vyššího rozlišení, než bude výsledné rozlišení snímku. Takže pokud kamera disponuje 4K rozlišením, EIS stabilizaci lze provést pro všechny nižší rozlišení kamery než je 4K, proto se tato metoda stabilizace zpravidla nepoužívá u kamer s nižším rozlišením. Další nevýhodou je, že účinnost této stabilizace se snižuje s úbytkem světla. [47]

#### 6.1.3 FOV

Mezi další uváděné parametry akčních kamer patří FOV (z anglického field of view), neboli úhel záběru objektivu. U akčních kamer se často setkáváme se širokoúhlým záběrem často vyšším než 150°. [48]

#### 6.1.4 Další parametry

Wifi je další z parametrů, který je dnes již standardem u mnoha akčních kamer. Umožňuje spárování s mobilním telefonem, na kterém je po spárování s kamerou možné pozorovat živý přenos obrazu z kamery, také je možné pomocí telefonu na dálku spustit nahrávání, nebo pořídit fotografii.

Některé akční kamery dokáží pořizovat záběry i pod vodou, přičemž vodotěsnost kamery bývá často řešena vodotěsným krytem kamery, který může kvůli těsnosti zhoršovat kvalitu nahrávaného zvuku.

Mezi dalšími oblíbenými parametry může být např. možnost pořizovat zpomalené záběry, nebo tvořit časosběrná videa přímo na kameře. [48]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cíle praktické části diplomové práce byly:

- Naskenovat bezkontaktním způsobem kvadrokoptéru
- Navrhnout kostru nové kvadrokoptéry
- Provést simulace mechanického namáhání na počítačovém modelu nového krytu
- Vyrobit funkční prototyp kvadrokoptéry

Cíl práce byl vyrobit funkční prototyp kvadrokoptéry, která bude schopná pořizovat snímky ve vysokém rozlišení. Kvadrokoptéra byla zkonstruována za pomoci využití znalostí z reverzního inženýrství, takže byla zakoupena koptéra, která byla následně přestavěna. Dalším z cílů praktické části práce bylo naskenovat bezkontaktním způsobem zakoupenou koptéru. Získaný sken byl následně použit při návrhu nového krytu koptéry. Ještě před samotnou výrobou byl počítačový model navržené koptéry testován v různých situacích, za pomoci simulací mechanického namáhání. Tyto simulace byly provedeny v softwaru NX. Následně byl navržený kryt koptéry vytištěn na 3D tiskárně technologií FDM. V další části byl zkonstruován nový prototyp kvadrokoptéry, která nese akční kameru. Následovalo několik testovacích letů. V poslední části práce byla porovnána kvalita pořízených snímků ze zakoupené a nově zkonstruované koptéry.

## 8 VÝBĚR KOPTÉRY

Pro praktickou část diplomové práce byla zvolena koptéra od značky Syma, konkrétní model Syma X8PRO. Z konstrukčního hlediska byla zvolena kvadrokoptéra kvůli dobrému vyvážení vlastností stability a obratnosti. Jedná se o rozměrově větší koptéru, rozteč mezi jednotlivými rotory je 500 mm a na výšku má koptéra 190 mm. Řídící signál funguje na vzdálenost kolem 100 m, ale jak již bylo popsáno, tato vzdálenost se může lišit podle počasí, nebo množství překážek v okolí.



Obr. 22 Syma X8PRO

### 8.1 Parametry zvolené koptéry

Jedním ze zásadních parametrů, které rozhodly pro výběr této koptéry, je zabudovaný GPS modul. Díky tomuto modulu je koptéra schopná po stisknutí tlačítka na ovladači sama přistát na místo vzletu, nebo se vrátit na místo vzletu po vybití baterií v ovladači, nebo koptéře. Další funkcí GPS modulu je návrat koptéry blíže k pilotovi, pokud se koptéra vzdálí mimo dosah signálu vysílačky. Bohužel koptéra nedisponuje senzory, které by zaznamenaly překážky, takže při automatických manévrech koptéry může jednoduše dojít ke střetu s překážkou. Mezi další přednosti koptéry určitě patří baterie, která má kapacitu 2000 mAh, díky tomu vydrží koptéra na jedno nabití baterie letět necelých 15 minut. Menší nevýhodou

je pak delší doba nabíjení baterie, která se pohybuje kolem 150 minut. Za další výhodu koptéry se dá považovat cena, která se u tohoto modelu pohybuje do 4500,- Kč.

Mezi další parametry zvolené koptéry patří vestavěný barometr, který pilotovi pomáhá udržet konstantní výšku. Koptéra je také vybavena 6-osým gyroskopem, který se snaží neustále držet základní desku ve vodorovné poloze a tím koptéru stabilizovat. Neméně důležitou součástí koptéry jsou LED diody, které informují světelnými signály pilota v případě slabé baterie, kalibrace dronu, pořízení fotografie, připojení koptéry k GPS satelitům, nebo spuštění kameře. Další funkcí koptéry je vytvoření vlastní wifi sítě, na kterou se lze připojit pomocí mobilního telefonu a následně sledovat přenos videa z kamery na telefon v reálném čase. Nevýhodou této funkce je malý dosah wifi signálu, který zcela nepokryje dosah řídicího signálu vysílačky. Mobilní telefon jde navíc připevnit přímo k vysílačce, takže pilot může snadno řídit koptéru a přitom sledovat záznamy z kamery.



Obr. 23 Vysílačka pro Symu X8PRO

Jedna z hlavních nevýhod zakoupené koptéry je v HD kameře, která nedisponuje žádnou stabilizací a pořízená videa i fotky jsou nekvalitní, to ale odpovídá ceně koptéry. Kamera má poměrně malý úhel záběru, to ale z části kompenzuje možnost natáčení čočky kamery v rozsahu 90 ° přímo z vysílačky.

Pomocí vysílačky lze taky přepínat mezi dvěma módy koptéry. První mód je určený pro začátečníky. Koptéra v tomto módu pomaleji manévruje, sníží se její maximální rychlost a zrychlení. Tento mód se hodí také pro natáčení, protože je možno pořizovat stabilnější záběry. Při přepnutí na druhý mód se ovládání koptéry zcela změní, ovládání začne být mnohem citlivější a rapidně naroste i výkon koptéry, tento mód je určený pro pokročilé piloty a kvůli zvýšenému výkonu motorů klesá i doba, po kterou koptéra vydrží ve vzduchu.



Jako jednu z dalších nevýhod této koptěry lze považovat nevýrazně označena přední a zadní část. To může vést ke ztrátě orientace a případné havárii, pokud pilot ovládá koptěru na delší vzdálenost. Na druhou stranu lze přepnout koptěru do tzv. headless módu. Tento mód způsobí to, že koptěra po nahnutí ovládací páky dopředu poletí vždy směrem od vás a ne směrem, kterým zrovna směřuje přední část koptěry, jako tomu je při standartním módu. Headless mód může být velice užitečný hlavně při letech na delší vzdálenost, chce to ale jistou zkušenost a zručnost pilota.

## 8.2 Obsah zakoupeného balení

Zakoupené balení obsahovalo: 1 x model koptěry s HD kamerou

1 x vysílač 2,4 GHz s držákem na mobilní telefon

1 x baterie 2000 mAh s akumulátorem

2 x sadu vrtulí

4 x kryty vrtulí

1 x sadu nářadí, návod k použití a čtečku SD karty



Obr. 24 Obsah balení dronu Syma X8PRO

## 9 VÝBĚR AKČNÍ KAMERY

Kamera pro budoucí návrh dronu byla zvolena od značky Lamax, konkrétní model X10 Taurus. Jedná se o akční kameru, která byla zvolena hlavně kvůli nízké hmotnosti, malým rozměrům a v neposlední řadě kvůli kvalitě pořízených snímků.



Obr. 25 Akční kamera Lamax X10 Taurus

### 9.1 Parametry zvolené kamery

Rozměry kamery jsou (61 x 42 x 23) mm (délka x výška x šířka) a hmotnost 79 g. Kamera disponuje elektronickou stabilizací EIS, tato funkce je pro použití kamery s kvadrokoptérou velmi užitečná. Koptéra ve vzduchu neustále vibruje a právě tyto vibrace jsou na videu nežádoucí, elektronická stabilizace by měla tyto vibrace částečně minimalizovat, a tím by mělo dojít k pořízení mnohem kvalitnějších snímků, než při použití kamery, která stabilizací nedisponuje. Stabilizace není ale to jediné, čím se kamera může pochlubit, dalším velice užitečným parametrem pro spojení kamery s koptérou je to, že kamera je schopná vytvořit vlastní wifi síť. Díky wifi lze přes aplikaci spárovat kameru s mobilním telefonem a následně sledovat obraz, který kamera aktuálně snímá na mobilním telefonu.

Pořizování videí a fotek zajišťuje snímač značky Sony s označením IMX 117, čipset Ambarella A12 a čočka která má úhel záběru 170°. Kamera je schopná natáčet v rozlišení 4K při 60 FPS a v rozlišení FullHD při 120 FPS. Pokud je zapnuta elektronické stabilizace EIS je kamera schopná pořizovat stabilní záběry v kvalitě FullHD při slušných 60 FPS. Kamera je navíc schopna pořizovat zpomalené záběry při maximálním rozlišení a maximální

hodnotě FPS je možné zpomalit výsledné video až 8x. Navíc lze s kamerou pořizovat časoběrná videa, kdy kamera snímá dle nastavení např. každých 30 s a výsledné video poté spojí do plynulého videa, které působí zrychleně. Díky 16 Mpx snímači není problém s kamerou pořizovat velmi kvalitní fotografie. Nevýhoda této kamery je natáčení při snížených světelných podmínkách, kdy prudce klesá kvalita pořizovaných videí. Na druhou stranu fotky v horších světelných podmínkách jsou ve velmi dobré kvalitě díky možnosti nastavení funkce dlouhé závěrky. Dlouhá závěrka funguje správně pouze při využití stativu, takže při focení z koptéry se tato funkce využít nedá. Kamera je navíc schopna pořizovat i časoběrné fotografie.

Kamera je vybavena baterií o kapacitě 1050 mAh, a to při zapnuté stabilizaci a maximálním možném rozlišení znamená cca 45min natáčení. Spolu s kamerou je dodáván vodotěsný obal, který zajišťuje neporušení kamery do hloubky 40 metrů, navíc je i přes vodotěsný obal poměrně vysoká kvalita nahraného zvuku, což u většiny akčních kamer nebývá zvykem. Výrobce navíc dodává kameru s 20 druhy různého příslušenství, a to od držáku na helmu, nebo na řídítka, přes dálkový ovladač, až po plovák, který znemožní potopení kamery pod hladinu vody.



Obr. 26 Obsah balení kamery Lamax X10 Taurus

## 10 TESTOVÁNÍ A DEMONTÁŽ KOPTÉRY SYMA X8PRO

V dalším kroku praktické části diplomové práce byly provedeny testy a demontáž zakoupené koptéry. Účelem prvního testu bylo zjistit, kolik gramů navíc unese zakoupená koptéra. Další test měl ověřit, jak se bude koptéra chovat, pokud nebude zcela symetrická a bude mít vychýlené těžiště mimo původní polohu, protože nový návrh koptéry nebude zcela symetrický.

### 10.1 Zátěžový test

Nejprve byla zkonstruována papírová krabička, kterou bylo možno připevnit k zakoupené koptéře. Následně bylo testováno, jak se koptéra za letu chová při přidávání zátěže do krabičky.



Obr. 27 Syma X8PRO s krabičkou se závažím

Bylo zjištěno, že při zátěži kolem 80 g se koptéra chová stejně, jako by žádné závaží nenesla. Pokud hmotnost závaží přesáhla 80 g, koptéra už nebyla schopná plynule stoupat. Tato skutečnost je způsobena nízkým výkonem motorů. Koptéra Syma X8PRO by tedy měla problém s unesením zakoupené kamery, která i s držákem váží necelých 100 g. Z testu vyplývá, že nově navržený kryt musí mít alespoň o 20 g nižší hmotnost, než má kryt současný, aby navržená koptéra fungovala správně.

## 10.2 Test vychýlení těžiště

Vychýlení těžiště probíhalo tak, že na jednu stranu koptéry byly připevněny nejprve dvě matice, které měly celkovou hmotnost 25 g. Následně byl proveden testovací let, při kterém nebylo zpozorováno žádné nezvyklé chování koptéry.



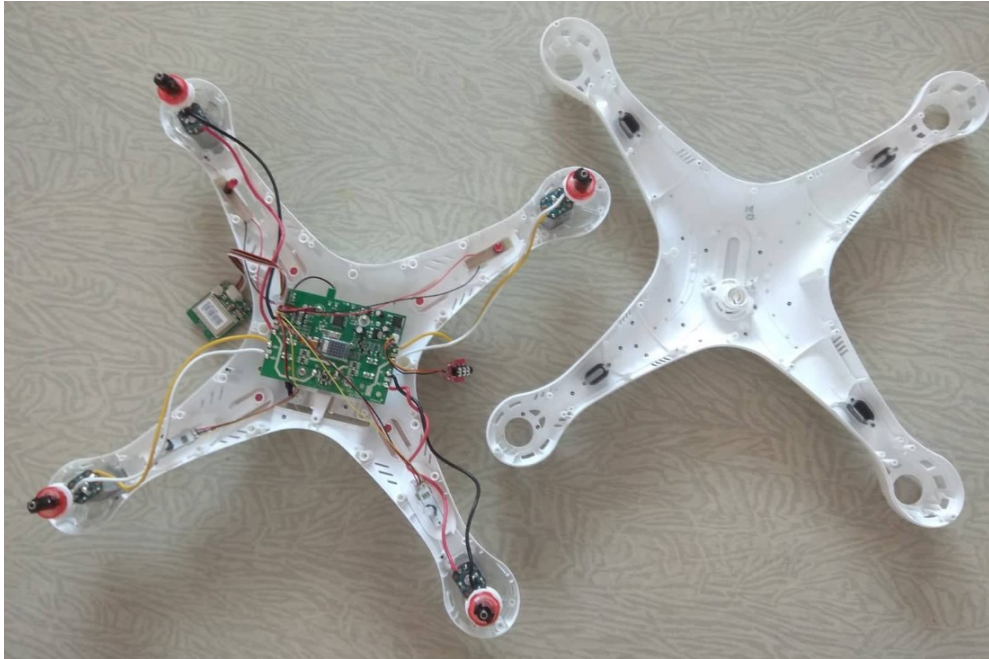
Obr. 28 Princip vychýlení těžiště koptéry

Následně byly na koptéru připevněny další dvě matice, aby došlo ještě k výraznějšímu vychýlení těžiště, celková hmotnost matic tedy byla 50 g. Byl proveden další testovací let, při kterém nebylo zjištěno jakékoliv nezvyklé chování koptéry.

Bylo tedy potvrzeno, že 6-osý gyroskop pracuje správně a nově navržená koptéra nemusí být zcela symetrická. Jedinou nevýhodou nesymetrie může být nerovnoměrné zatížení všech motorů. Tato skutečnost může vést k nižší životnosti motorů, které jsou více zatěžovány.

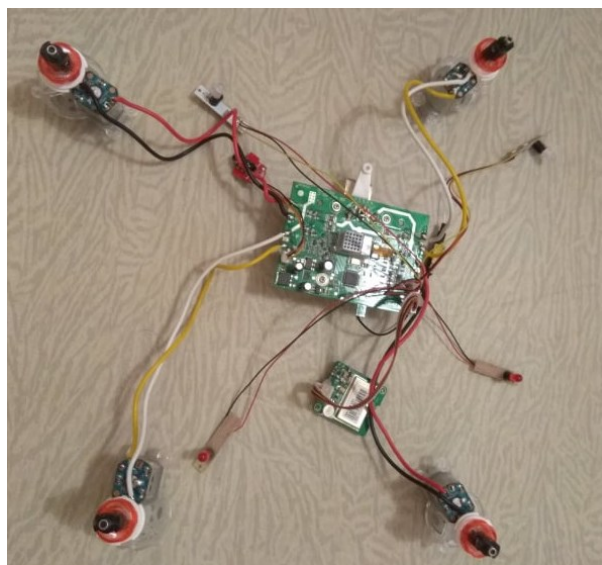
### 10.3 Demontáž zakoupeného dronu

Obě části zakoupené koptéry byly k sobě připevněny pomocí šroubů a středících tyčinek. Po vyjmutí těchto spojovacích a středících prvků již bylo možné oddělit od sebe obě části. Následně byly odstraněny šrouby, které držely GPS modul na horním krytu.



Obr. 29 Demontovaná Syma X8PRO

Z demontované koptéry byly následně vyjmuty motory, základní deska, diody a GPS modul. Tyto součástky budou následně použity v nově navrženém modelu koptéry. Horní a spodní kryt koptéry bude použit při 3D skenování.

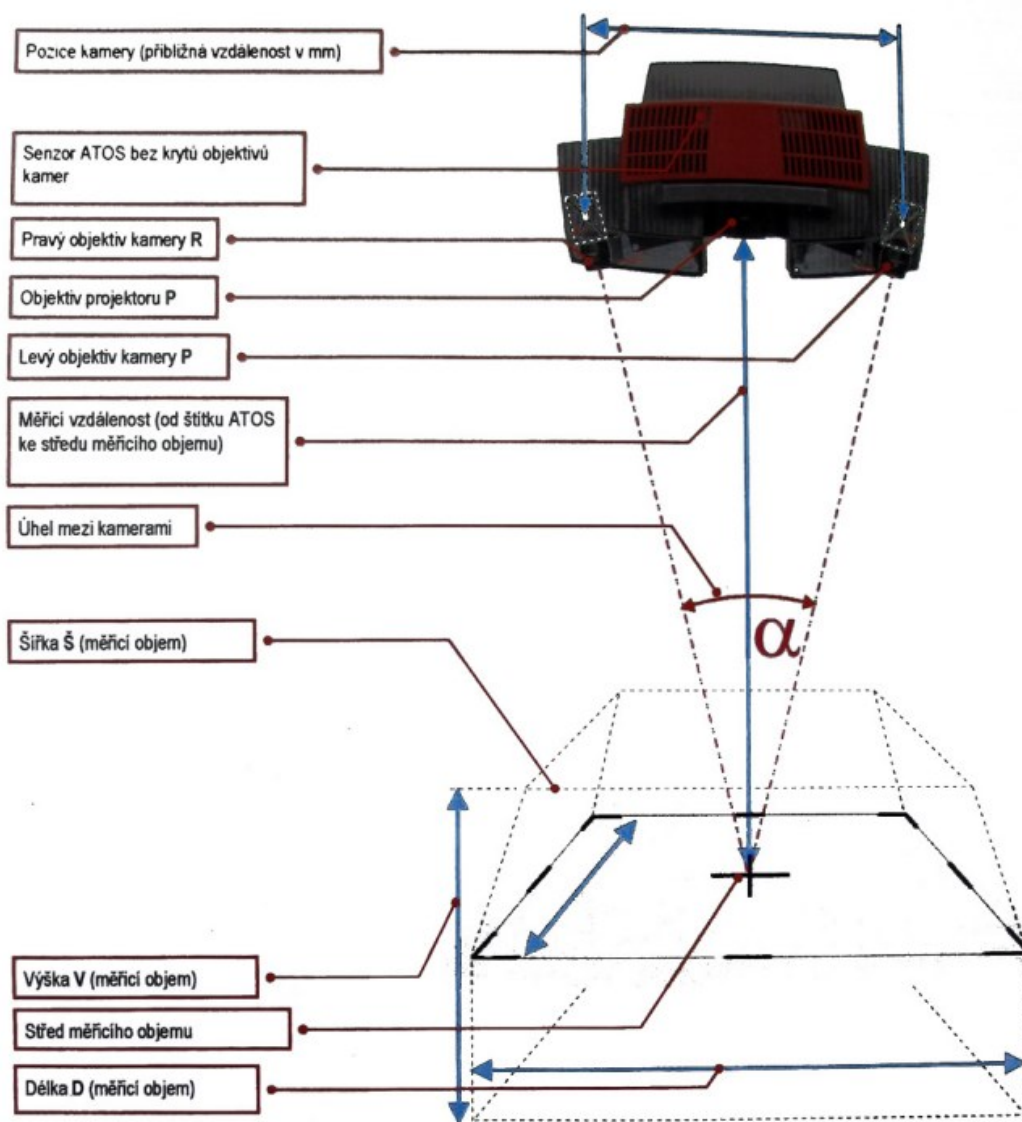


Obr. 30 Použité součástky

## 11 SKENOVÁNÍ KRYTŮ

### 11.1 Popis skeneru ATOS II Triple Scan

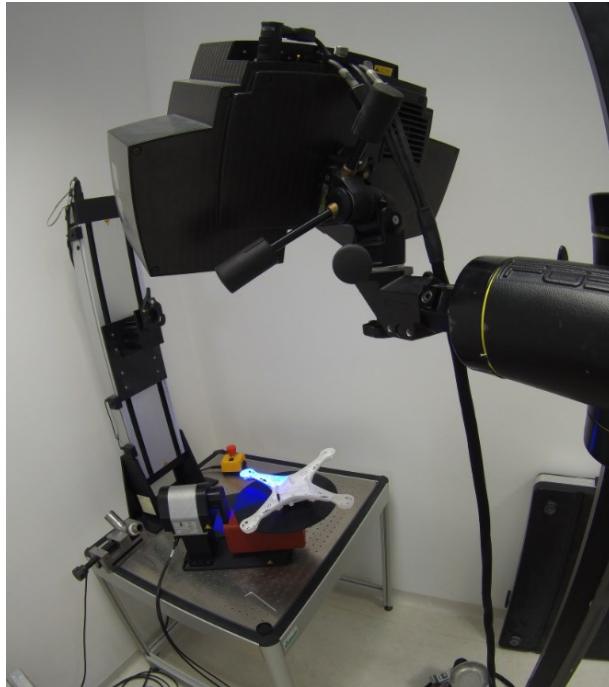
Ke skenování byl použit skener Atos II Triple Scan. Jedná se o nedestruktivní, optický 3D skener, který je osazen čipy s vysokým rozlišením. Je schopný velmi rychle a přesně vytvářet 3D data skenovaného objektu. Těto skutečnosti pomáhá i to, že řídicí software ATOS Inspect Professional je vytvořen výrobcem skeneru. Tím je zajištěna správná kompatibilita softwaru a hardwaru. Skener má nízkou hmotnost a je velmi kompatibilní. To mu spolu s možností nastavení různých skenovacích objemů zajišťuje velmi rozmanité možnosti použití. Na dalším obrázku jsou popsány jednotlivé díly tohoto zařízení a parametry týkající se skenování dílu.



Obr. 31 Popis zařízení ATOS II Triple Scan [48]

## 11.2 Skenování dílů

Před samotným skenováním bylo nutné skener zkalibrovat a následně nastavit vhodný skenovací objem.



Obr. 32 Skenování optickým skenerem

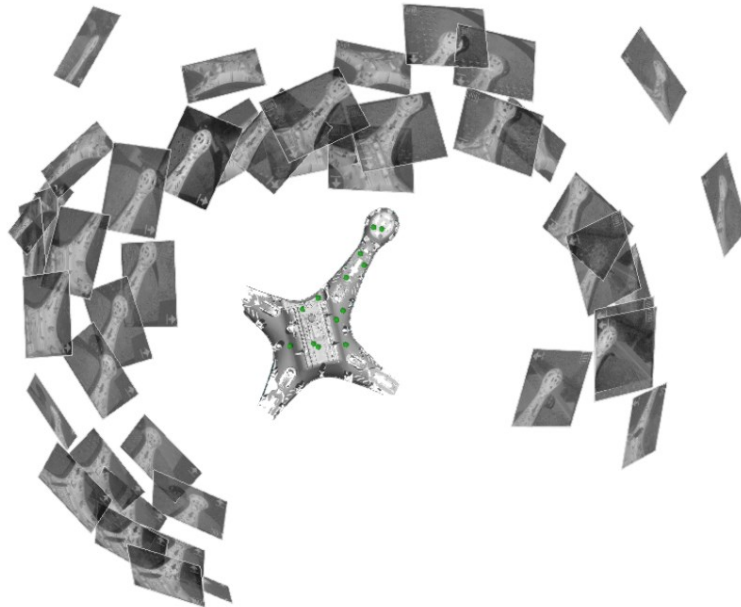
Při návrhu nového krytu koptéry bylo potřeba znát vnitřní rozměry zakoupeného krytu. Vnitřní rozměry krytu nelze změřit ručně, proto bylo pro zjištění rozměrů využito optického skeneru. Horní a spodní kryty zakoupené koptéry byly polepeny referenčními body. Takto přichystané kryty byly jednotlivě umístěny na otočný stolek.



Obr. 33 Detail skenování spodního krytu koptéry

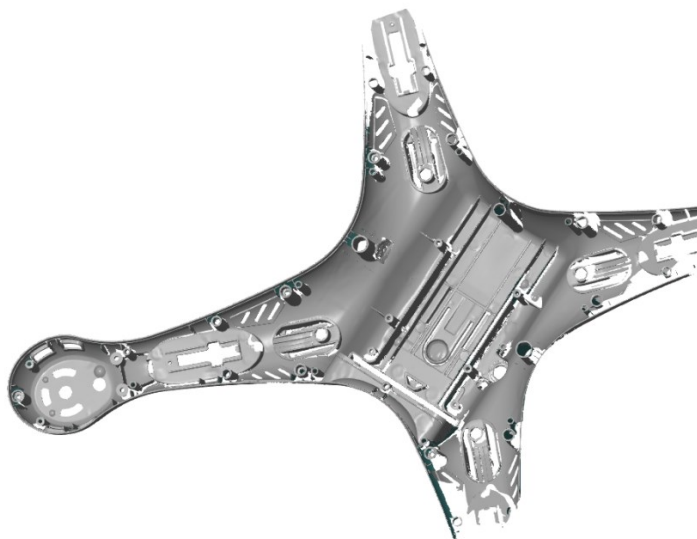


Postup skenování probíhal tak, že kryt byl skenerem vždy nasnímán z jednoho úhlu, a poté byl pootočen stolek, na kterém byl kryt umístěn. Po otočení stolku byl kryt opět nasnímán. Tento postup byl opakován, dokud nebyly vytvořeny snímky ze všech úhlů skenovaného krytu.



Obr. 34 Princip skládání snímků pomocí referenčních bodů

Díky referenčním bodům bylo následně možné spojit jednotlivé snímky do jednoho výsledného obrazu. Čím vyšší je počet pořízených snímků skenerem pod různými úhly, tím přesnější je získaný obraz. Získaný obraz byl převeden do formátu STL a následně byl otevřen v softwaru Catia V5R19. Výsledek skenování je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 35 Výsledný obraz získaný skenerem

## 12 KONSTRUKCE NOVÉ KOPTÉRY

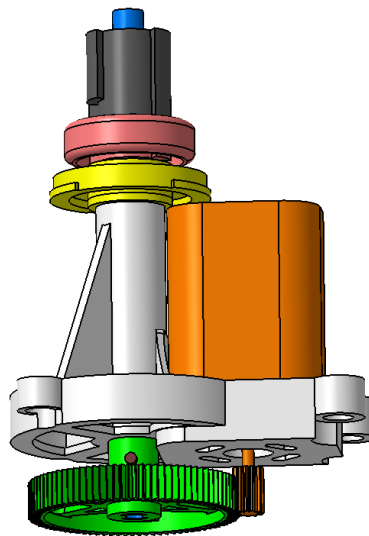
V této kapitole je krok po kroku popsán návrh nové koptéry. Z předchozích testů vyplývá, že nová konstrukce musí být minimálně o 20 g lehčí, než je konstrukce současná. Hlavním cílem bylo tedy snížit hmotnost koptéry tak, aby k ní bylo možné připevnit zakoupenou kameru, která i s držákem váží necelých 100 g.

### 12.1 Catia V5R19

Jedná se o CAD / CAM / CAE software, který je provozován společností Dassault Systèmes. Využívá se především k vytváření 3D modelů a to díky velmi propracovanému uživatelskému prostředí. To nabízí velkou škálu různých modulů, díky kterým je možné např. snadno tvořit modely vstřikovacích forem, tvořit technickou dokumentaci, nebo vytvářet složité sestavy z vymodelovaných dílů. Mimo jiné Catia také nabízí velmi propracovaný modul, který byl navržen na vytváření a úpravu ploch ve 3D prostředí. Tento modul je využíván konstruktéry po celém světě, protože umožňuje vytvářet i velmi složité 3D modely. Je proto využíván např. při návrhu letadel, lodí, nebo automobilů. V této práci byl software Catia verze V5R19 použit především k vytvoření návrhu nové koptéry a vymodelování jejich funkčních součástí.

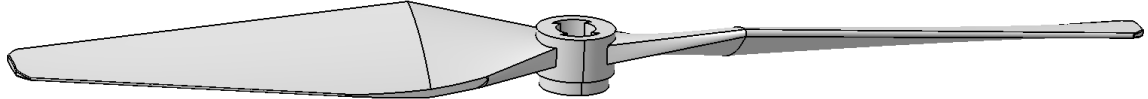
### 12.2 Modelování součástí zakoupené koptéry

Jako první byla zkonstruována sestava stejnosměrného motoru, spolu s ozubenými koly a hřídelí, přes kterou je přenášen točivý moment na vrtule.



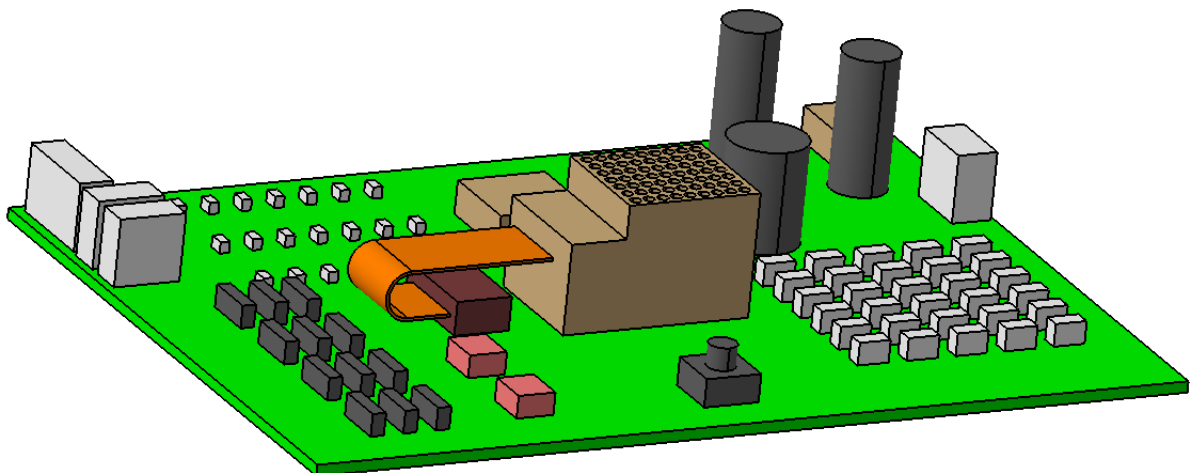
Obr. 36 Sestava stejnosměrného motoru

Následně byla vymodelována vrtule, která byla připojena k vymodelované sestavě motoru.



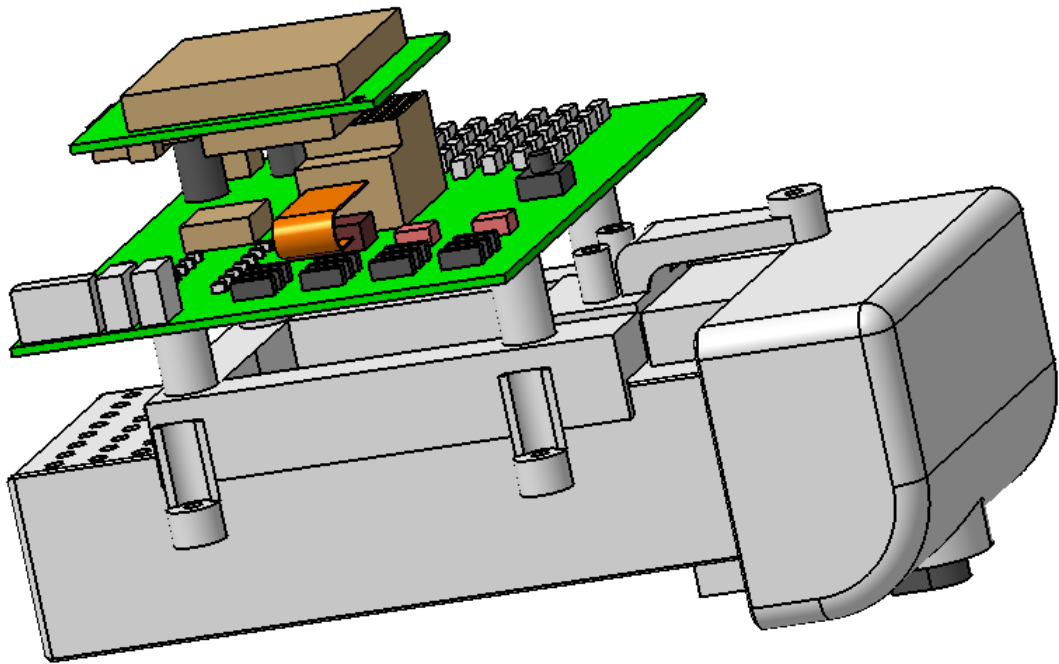
Obr. 37 Model vrtule

V dalším kroku byla vymodelována základní deska, na kterou jsou připojené řídicí prvky koptéry, jako je např. barometr nebo 6-osý gyroskop.



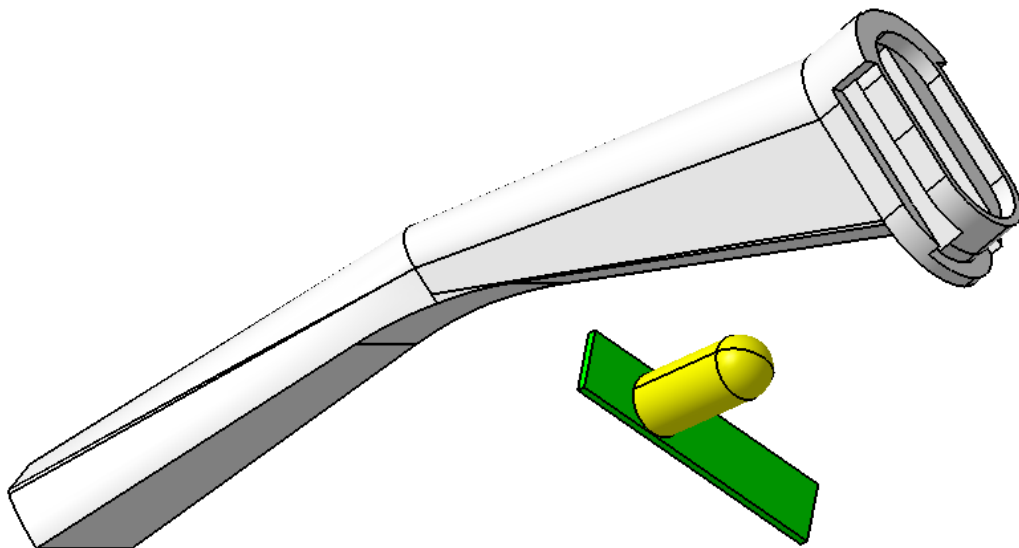
Obr. 38 Model základní desky

K modelu základní desky byl vymodelován držák, který byl připevněn ke spodnímu krytu koptéry. K této sestavě byla vymodelována baterie, která bude vstupovat do zmíněného držáku a přes vodiče bude napájet základní desku a motory koptéry. Poslední součástka této sestavy je GPS modul, který bude následně přišroubován k hornímu krytu navržené koptéry.



Obr. 39 Sestava základní desky s držákem, baterií a GPS modulem

V posledním kroku modelování součástek byly vymodelovány signalizační diody a přistávací nohy zakoupené koptéry.

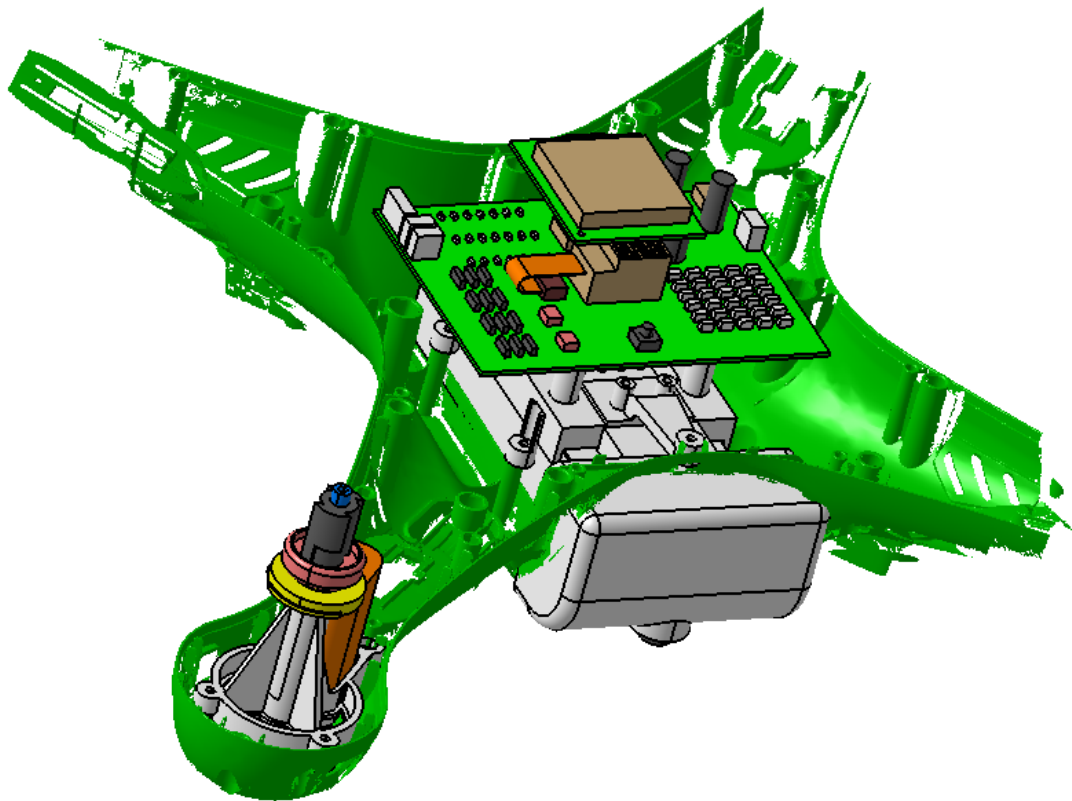


Obr. 40 Model přistávací nohy a signalizační diody

### 12.3 Nastavení správné polohy použitých součástek

Nejprve byl v softwaru Catia V5R19 otevřen STL soubor naskenovaného krytu. Na tento sken byly následně zakotveny veškeré použité součástky, a to z toho důvodu, aby byla poloha všech součástek na stejném místě jako v původním koptéře. Tento postup byl také

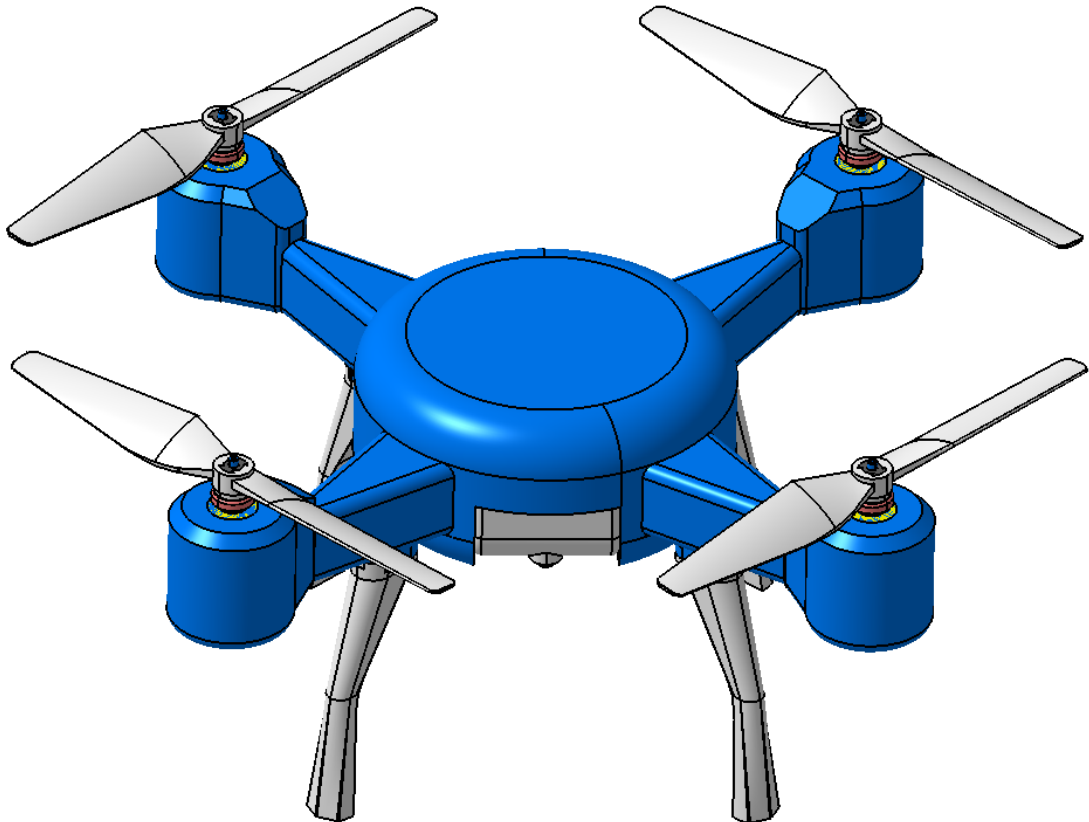
zvolen proto, aby bylo možné ověřit, zda jsou přesně vymodelované součástky, které budou následně použity v nové koptěře. Díky získanému skenu bylo tedy možné odměřit vnitřní rozměry krytu a na základě těchto rozměrů bylo možné přesně vymodelovat použité součástky.



Obr. 41 Sken obalu s modely součástek

## 12.4 Návrh nového krytu

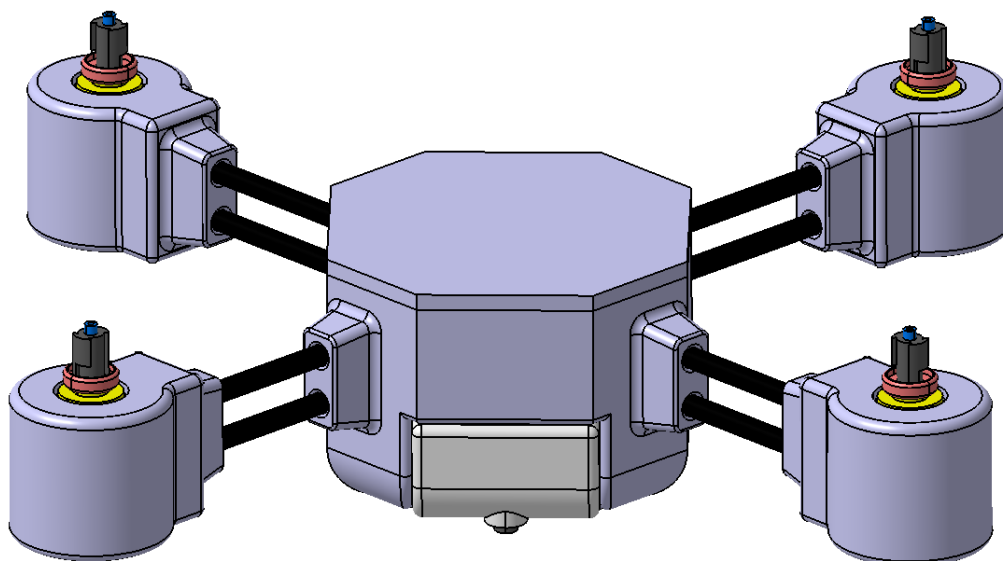
Bylo provedeno několik návrhů nového krytu, které byly následně upravovány. Z vytvořených návrhů byly vybrány dva. První návrh byl pojmenován UFO a byl navržen tak, že ramena, tělo koptéry a kryty motorů jsou z plastu, stejně jako je tomu u originální koptéry.



Obr. 42 Návrh koptéry UFO

Vzhledem k tomu, že pro výrobu nového krytu bude využita technologie 3D tisku, musí mít nový návrh koptéry větší tloušťku stěny než je tomu u originálního krytu. Originální kryt byl vyroben technologií vstřikování, a ta umožňuje vyrobit kryt tenčí. Tloušťka stěny tištěného krytu bude cca 2 mm. Tato skutečnost by mohla v budoucnu způsobit problémy, protože váha starého krytu je 235 g a odhadovaná váha tohoto krytu byla kolem 500 g. Na krytu by bylo možno udělat několik kroků, které by vedly ke snížení hmotnosti, ale stejně by se celková hmotnost krytu ani nepřiblížila hmotnosti původního krytu. Z tohoto důvodu byl tento návrh zamítnut.

Jako další byla zkonstruována koptéra, která byla následně pojmenována HERO. U tohoto návrhu bylo hlavním cílem značně snížit hmotnost oproti prvnímu návrhu. Hlavní rozdíl oproti prvnímu návrhu je v použití uhlíkových kompozitních materiálů. Tyto materiály nahradí plastová ramena koptéry. Celková odhadovaná hmotnost návrhu koptéry HERO je značně nižší než odhadovaná hmotnost návrhu UFO, proto byl pro další práci zvolen návrh HERO.

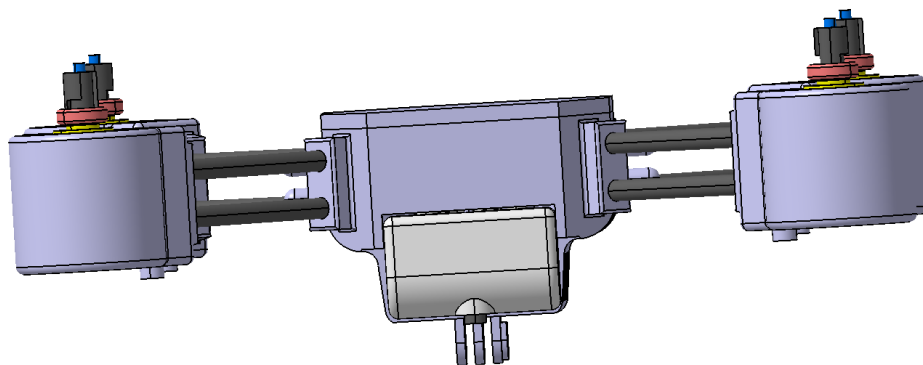


Obr. 43 Návrh koptéry HERO

## 12.5 Odlehčení koptéry HERO

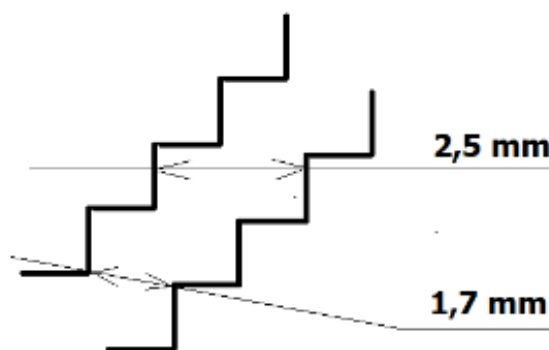
Použití uhlíkových kompozitních materiálů na místo plastových ramen vedlo ke snížení hmotnosti o více jak 100 g. Celková váha koptéry přesto byla odhadnuta na více než 350 g, takže hmotnost bylo i nadále nutné snížit alespoň o 150 g, aby se váha nového krytu pohybovala okolo 200 g. Při váze 200 g by neměl mít nový návrh koptéry problém s unesením zakoupené kamery.

Prvním krokem odlehčení nového návrhu byla tedy celková změna tvaru hlavního krytu koptéry. Tento kryt chrání před poškozením základní desku a ukotvuje baterii. První fází odlehčení bylo zúžení krytu kolem baterie, protože zde materiál, který byl navíc, neplnil žádnou funkci.



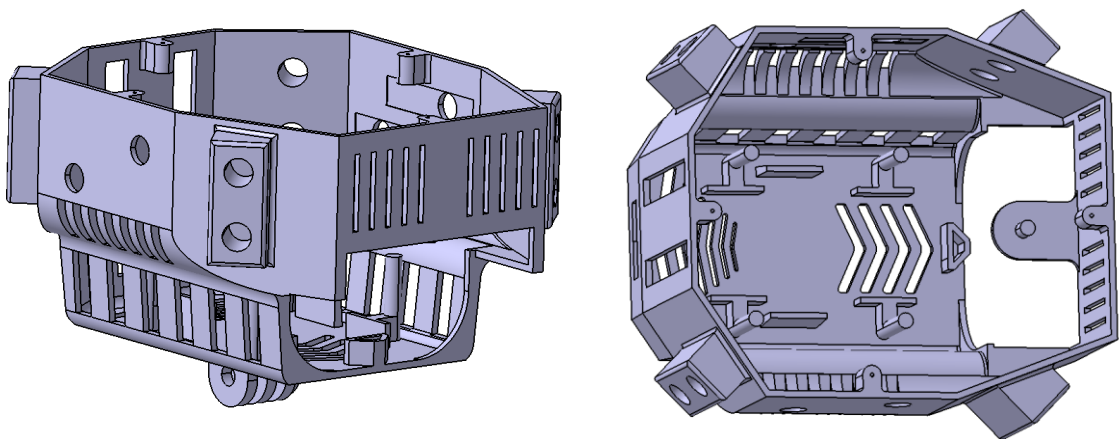
Obr. 44 Zúžený kryt koptéry HERO

Další fází odlehčování tohoto krytu byla úprava tloušťky stěn v určitých místech. Tiskárna, na které bude obal vytištěn, má doporučenou tloušťku rovných stěn 1,7 mm. V případě zaoblených stěn je doporučena tloušťka alespoň 2,5 mm. Vyšší tloušťka zaoblených stěn je doporučena z důvodu toho, že při technologii tisku FDM jsou jednotlivé vrstvy materiálu kladeny vedle sebe. Kládání těchto vrstev způsobuje u zaoblených stěn to, že v některých místech stěny může být tloušťka nižší, než je navržena. Při tloušťce stěny 2,5 mm by měla být zachována tuhost celé stěny výtisku a po vytištění by neměla vznikat místa užší, než 1,7 mm. Problematika kládání vrstev u zaoblených stěn je zobrazena na následujícím obrázku.



Obr. 45 Problematika tvorby zaoblených stěn FDM technologie

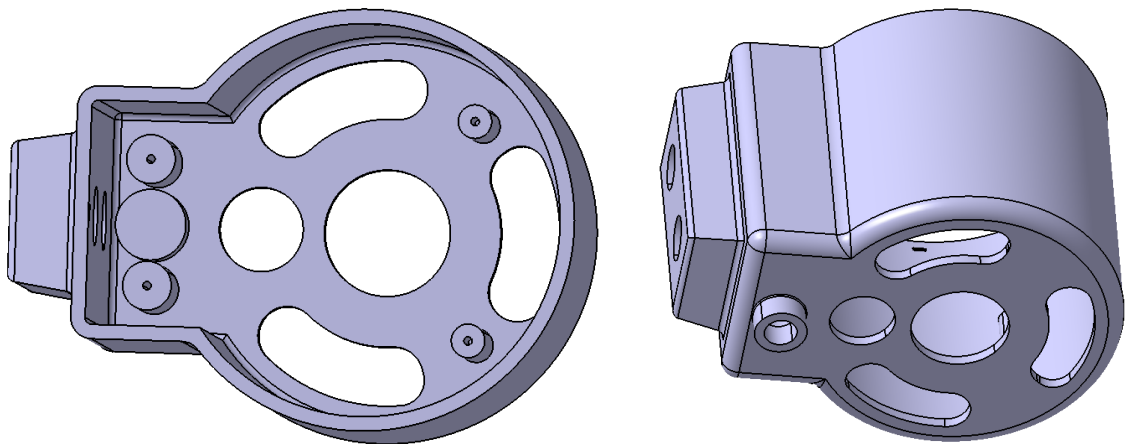
Veškeré horizontální a vertikální stěny byly tedy upraveny na tloušťku 1,7 mm a zaoblené části krytu byly navrženy s tloušťkou stěny 2,5 mm. Poslední fází odlehčování tohoto krytu bylo vytvoření několika otvorů, které by neměly nějak významně ovlivnit tuhost celého krytu, ale ještě ubrat na jeho hmotnosti. Následně byly vytvořeny úchytné prvky, do kterých bude následně ukotvena základní deska spolu s baterií. Původní hmotnost navrženého krytu byla 130 g, po odlehčení je hmotnost 66 g.



Obr. 46 Model odlehčeného krytu základní desky a baterie



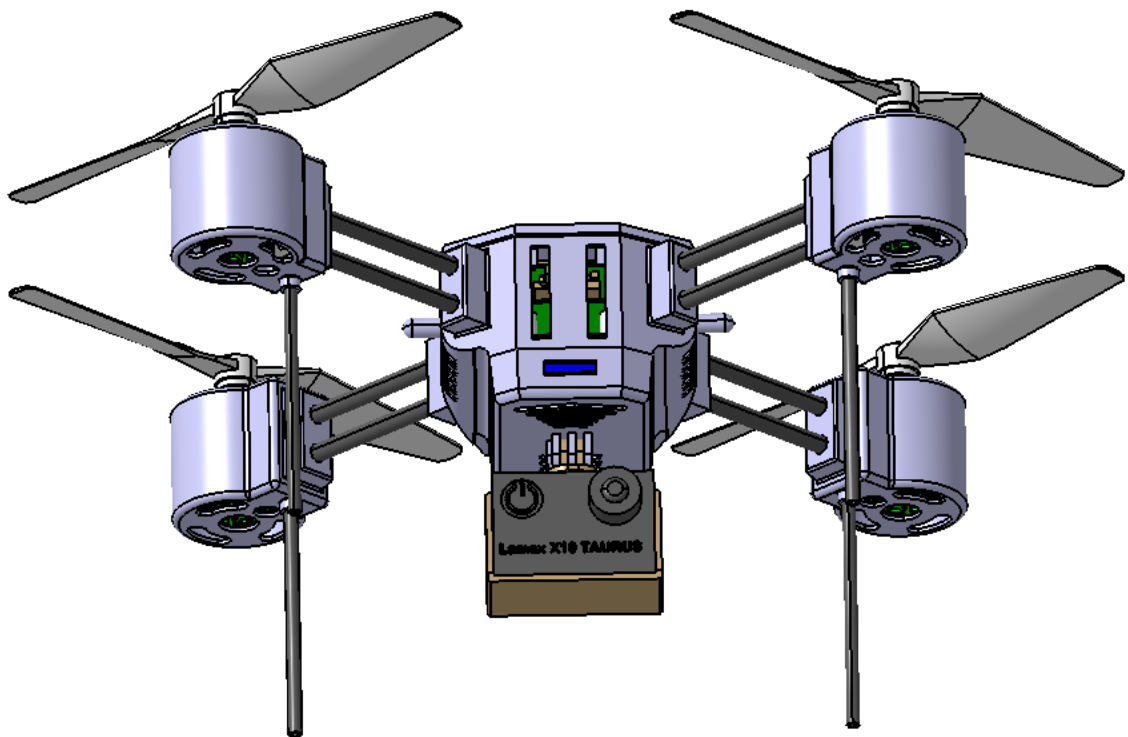
Po odlehčení krytu základní desky následovalo odlehčení spodní části krytu motorů. Hlavní změnou zde bylo zúžení tloušťky všech stěn z původních 2,5 mm na 1,7 mm. Následně byly vytvořeny otvory ve dně těchto krytů. V těchto krytech byly následně vytvořeny úchytné prvky pro ukotvení motorů a přistávacích nožek. Přistávací nožky nové koptéry byly navrženy dále od sebe, než je tomu u původní koptéry. Díky tomu bude s novou koptérou možné snadněji přistát. Navíc bude minimalizován negativní jev v podobě přistávacích nožek v záběru z kamery. Tento negativní jev může vzniknout u nového návrhu, protože nová kamera má mnohem vyšší úhel záběru. Řešením by také bylo umístit kameru na horní část koptéry, ale z hlediska stability je výhodnější kameru umístit do spodní části pod úroveň vrtulí. Umístění kamery nad úroveň vrtulí by mohlo vést ke špatné stabilitě celé koptéry a navíc by mohlo snáze dojít k poškození kamery, která je ve spodní části kryta přistávacími nožkami. Původní hmotnost spodních krytů motorů byla 122 g, po odlehčení je hmotnost krytů 87 g.



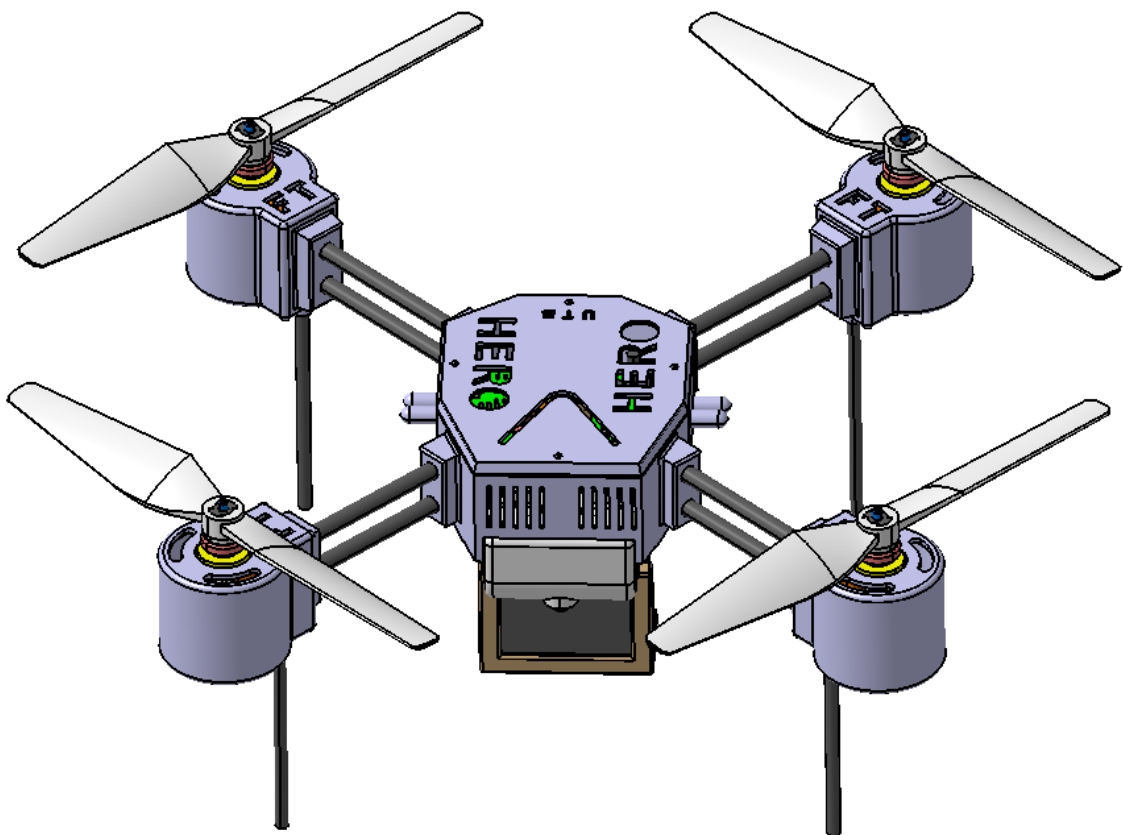
Obr. 47 Odlehčený model spodního krytu motorů

Poslední částí úpravy navrženého krytu byla úprava horních krytů motorů a horního krytu základní desky. U těchto krytů byla také zmenšena tloušťka stěny z 2,5 mm na 1,7 mm a následně byly vytvořeny otvory, které mají opět součástky odlehčit. Výsledná hmotnost horního krytu základní desky byla tedy snížena z 33 g na 16 g a výsledná hmotnost horních krytů motorů byla snížena z 69 g na 13 g.

Veškeré tištěné součástky byly tedy odlehčeny z původní hmotnosti 354 g na 182 g. K výsledné hmotnosti odlehčených součástek bylo nutné ještě přičíst hmotnost ramen (15 g) a přistávacích nožek (7 g), které jsou tvořeny z uhlíkových kompozitních materiálů. Celý kryt má tedy hmotnost 204 g, takže oproti původnímu krytu je lehčí o 31 g.



Obr. 48 Přední část odlehčené verze koptéry HERO



Obr. 49 Zadní část odlehčené verze koptéry HERO

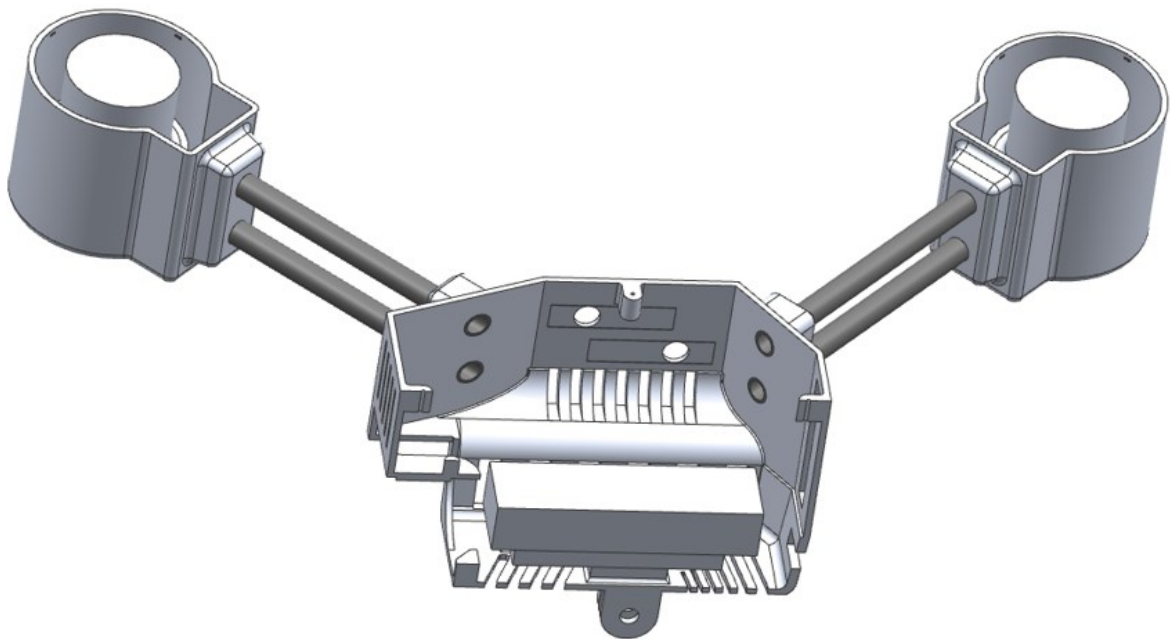
## 13 SIMULACE MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ

### 13.1 NX 12

NX je 3D software od společnosti Siemens, umožňující hlavně modelování 3D objektů. Tento software nabízí i tvorbu výkresové dokumentace, nebo tvořit programy, kterými se řídí CNC stroje při obrábění. Včetně zmíněných funkcí lze v softwaru NX 12 provádět simulace mechanického namáhání počítačových modelů. Právě za účelem simulací mechanického namáhání bude software NX 12 v práci použit. Cílem simulací bude zjistit, zda zvolený materiál vyhovuje aplikaci, pro kterou byl zvolen.

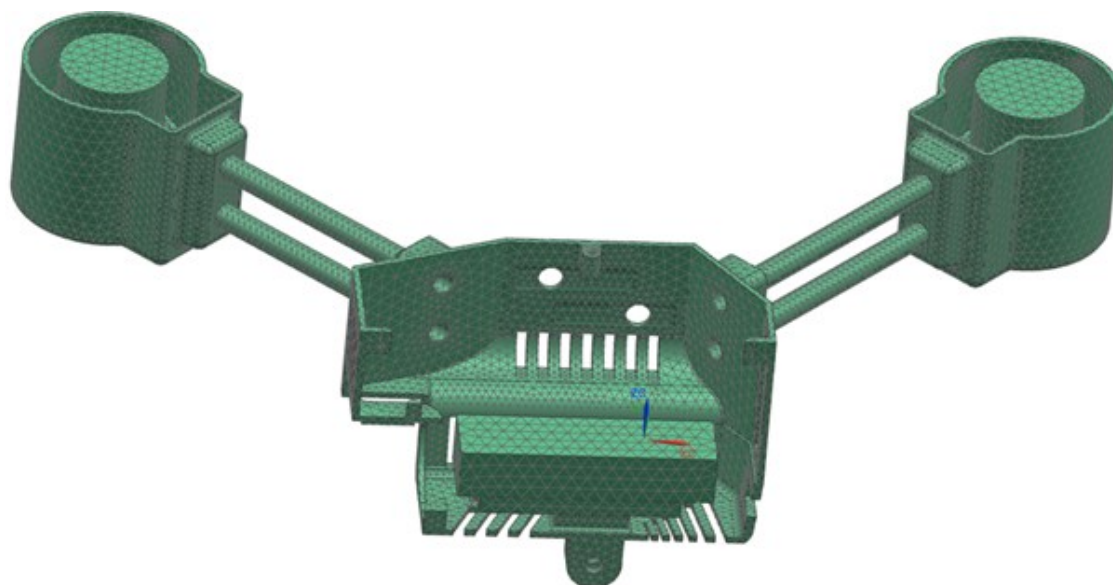
### 13.2 Nastavení okrajových podmínek analýzy

Nejprve bylo nutné provést malé změny na stávajícím modelu. Základní deska, GPS modul, baterie a kamera koptéry byly nahrazeny kvádrem o vysoké hustotě. Tento kvádr má stejnou hmotnost jako zmíněné součástky a simuluje tedy tíhu, které tyto součástky vyvíjí, stejně tak byly motory nahrazeny válcem.



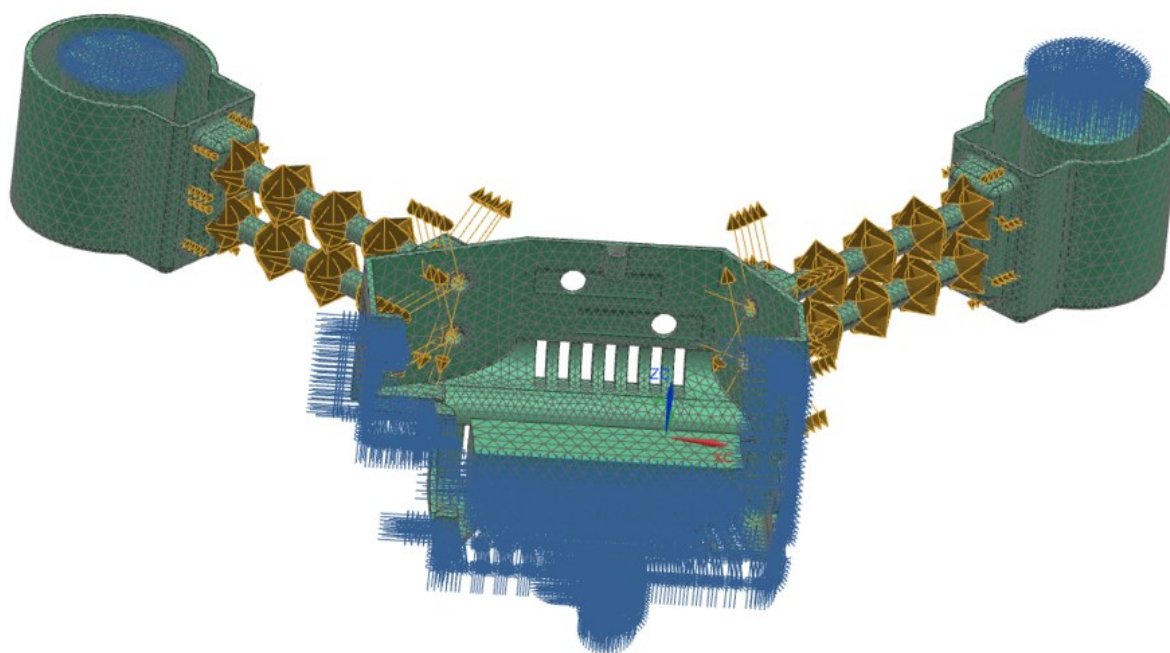
Obr. 50 Model určený pro simulace

Model je zrcadlově symetrický, díky tomu postačí pro simulace pouze jedna polovina modelu, to může významně zkrátit čas výpočtu. Takto připravený model byl importován do softwaru NX a byl vysítován. Byla použita 3D síť, kde zvolená délka jedné strany elementu byla 4,3 mm.



Obr. 51 Vysíťovaný model

Následovalo definování okrajových podmínek. Nejprve byla použita vazba symetrie, která nahrazuje druhou polovinu modelu a byla aplikována na veškeré plochy, kterými prochází řez. Na jeden válec, který nahrazuje motor koptéry byla aplikována vazba, která zamezuje pohybu v ose Z, na druhý válec byla aplikována vazba, která zamezuje pohybu ve všech třech osách. Následně byla přidána vazba, která nahrazuje lepidlo mezi rameny koptéry a částmi, které ramena spojují.



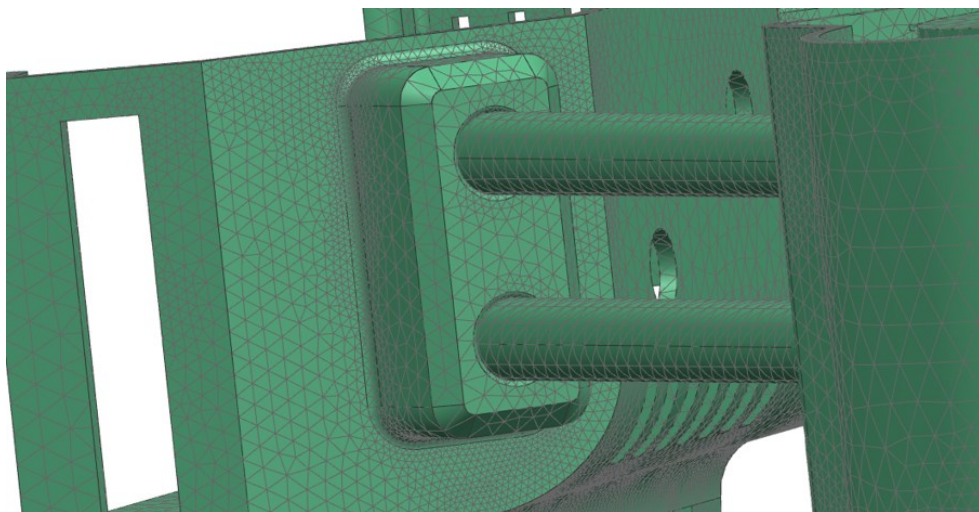
Obr. 52 Vysíťovaný model s definovanými okrajovými podmínkami

V posledním kroku byly přiřazeny materiály k jednotlivým dílům testovaného modelu. Kryty motorů a základní desky budou vyrobeny na 3D tiskárně. Bude použita technologie FDM a pro tisk byl zvolen materiál ABS. Tento materiál je za normálních okolností izotropní. Při použití technologie FDM má tento materiál nejnižší pevnost v tahu v tom směru, ve kterém probíhá nanášení jednotlivých vrstev na sebe. Pevnost v tahu tohoto materiálu je 28 MPa. Hraníční napětí, které na materiálu může vzniknout je 26 MPa. Tato hodnota odpovídá mezi kluzu materiálu a v tento moment již začnou v materiálu vznikat nevratné deformace. Další parametry, které bylo nutné pro tento materiál nadefinovat, jsou hustota  $1045 \text{ kg/m}^3$ , modul pružnosti 2100 MPa a Poissonovo číslo 0,35.

Následně byly nadefinovány parametry pro ramena koptéry a přistávací nožky, které jsou z uhlíkového kompozitního materiálu. Tento materiál je ortotropní a jeho mez pevnosti v tahu se pohybuje kolem 2 000 MPa. Vzhledem k tomu, že se předpokládá vznik řádově nižšího napětí na tomto materiálu, byla nadefinován jako izotropní. Pro tento materiál byla nadefinována hustota  $1405 \text{ kg/m}^3$ , modul pružnosti 200 GPa a Poissonovo číslo 0,1.

### 13.3 Simulace mechanického namáhání při působení gravitace

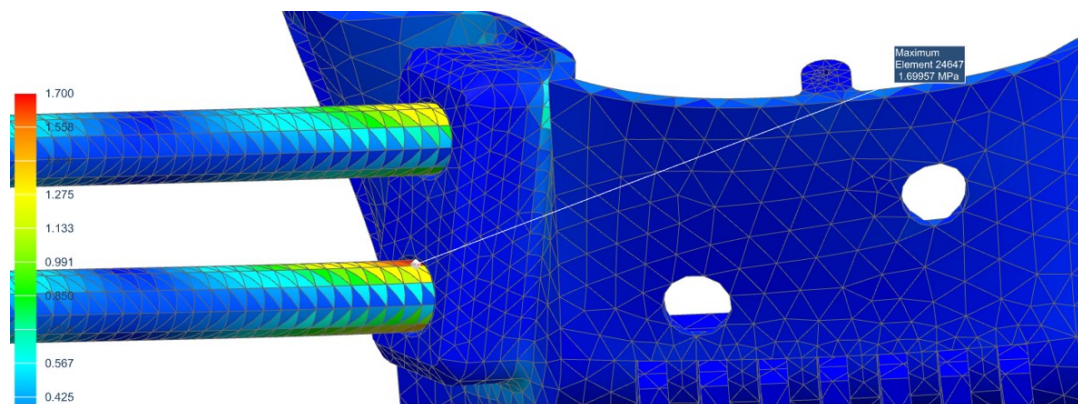
Jako první byla simulována situace, kdy koptéra pouze „visí“ ve vzduchu, to znamená, že s ní pilot neprovádí žádné manévry. Na přichystaný model bylo tedy aplikováno gravitační zrychlení  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Po prvním výpočtu simulace software zobrazí výsledky s velkou chybou, která se pohybuje kolem 15 %. Aby byla tato chyba co nejvíce eliminována, software umožňuje lokální zmenšení velikosti elementů 3D sítě v místech, kde vzniká jakékoliv vyšší napětí.



Obr. 53 Příklad zmenšených elementů sítě v kritických místech

Skutečnost, že software zmenší elementy pouze v kritických místech, výrazně snižuje čas výpočtu celé simulace. Při snaze dosáhnout přesnějšího výsledku totiž výrazně roste doba, po kterou software provádí výpočet celé situace. Veškeré uvedené výsledky jsou zobrazeny s 3 % chybou. Při takto nastavených parametrech trval výpočet jedné simulované situace cca 45 minut.

Po vypočtení první nastavené situace bylo zjištěno, že největší napětí vzniká na předních ramenech koptéry v blízkosti krytu základní desky viz obr. 54. Maximální hodnota Von Misesova napětí byla zjištěna 1,70 MPa, dovolené napětí uhlíkových kompozitních materiálů se pohybuje okolo 2000 MPa.



Obr. 54 Maximální napětí při zatížení koptéry gravitací

Vzhledem k vysoké pevnosti uhlíkových kompozitních materiálů bylo dále zjištěno napětí na plastových dílech, které má cca 10 x menší pevnost než zmíněný kompozit.

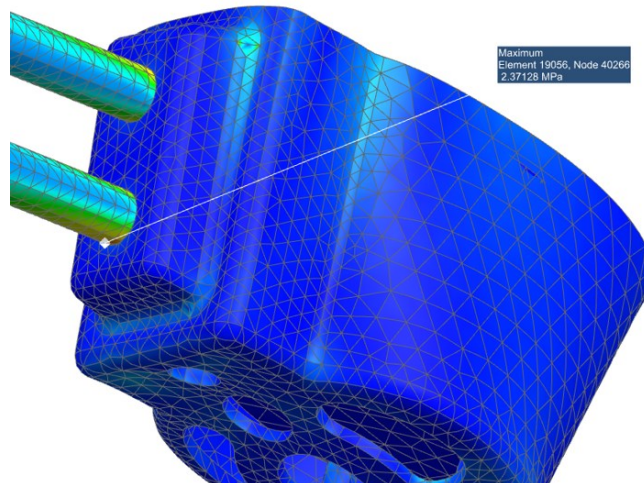


Obr. 55 Napětí v rizikových místech koptéry při působení gravitace

Největší hodnota napětí zde byla zjištěna 0,65 MPa, dovolené napětí tištěného ABS se pohybuje kolem 26 MPa. Koptéra tedy z pevnostního hlediska této situaci vyhovuje.

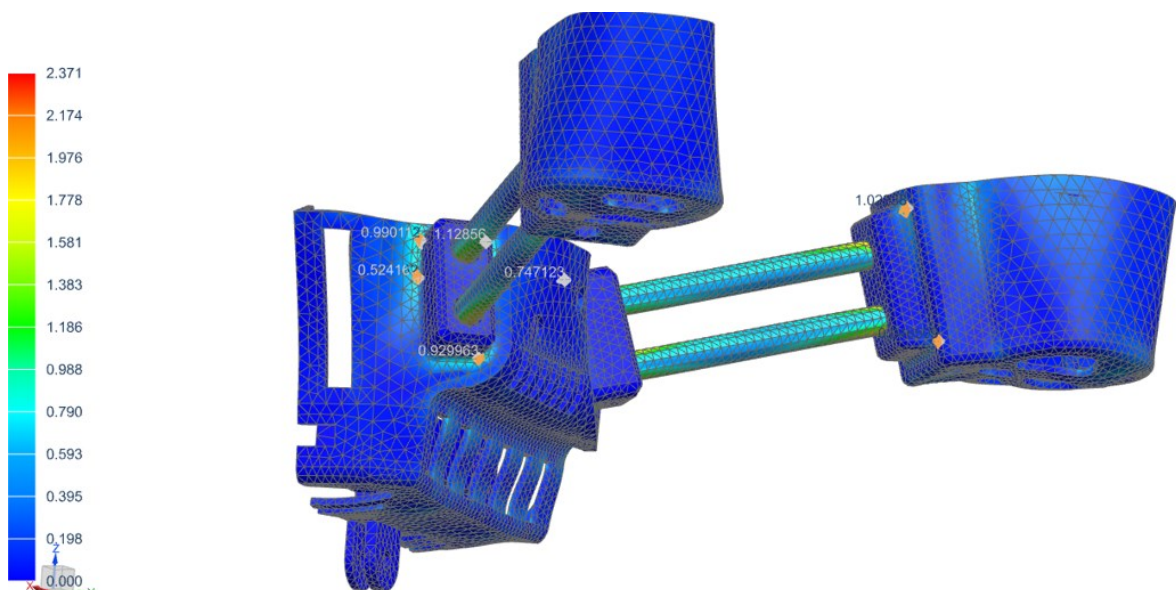
### 13.4 Simulace mechanického namáhání při stoupaní koptéry

Jako další byla simulována situace kdy koptéra stoupá vertikálním směrem. Zrychlení koptéry udávané výrobcem je  $2,5 \text{ m/s}^2$ . K základním okrajovým podmínkám byla tedy opět přidána gravitační tíha  $9,81 \text{ m/s}^2$  a následně ještě zmíněná akcelerace  $2,5 \text{ m/s}^2$ . Maximální hodnota Von Misesova napětí byla opět zjištěna na předních ramenech, tentokrát ale blíže krytu motorů. Hodnota tohoto napětí byla  $2,37 \text{ MPa}$ .



Obr. 56 Maximální napětí při vertikální akceleraci koptéry

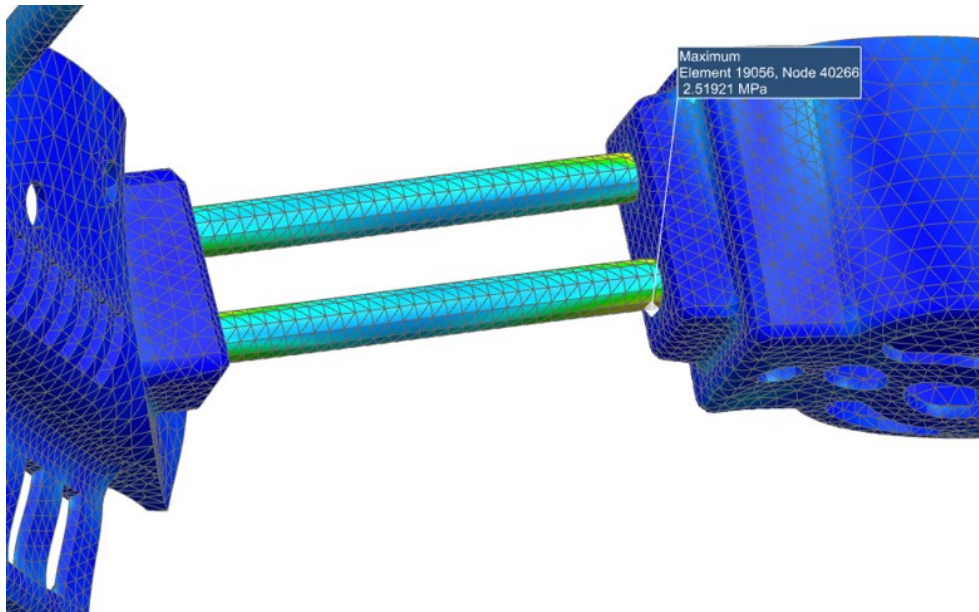
Co se týče plastových dílů, ani v této situaci nebyla překročena hodnota maximálního dovoleného napětí  $26 \text{ MPa}$ . Maximální hodnota Von Misesova napětí v kritických místech byla zjištěna  $1,13 \text{ MPa}$ . Koptéra tedy i v téhle situaci nepřekračuje žádné z dovolených napětí.



Obr. 57 Napětí v kritických místech při akceleraci

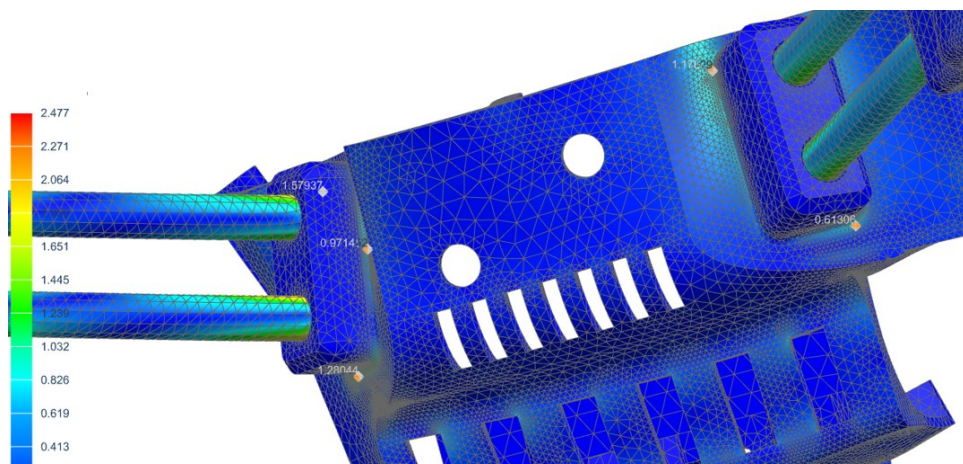
### 13.5 Simulace mechanického namáhání při manévrování koptéry

Jako další byla zvolena situace, kdy koptéra vertikálně stoupá se zrychlením  $2,5 \text{ m/s}^2$ , je přitahována gravitační tíhou a navíc se pohybuje do strany se zrychlením  $2,5 \text{ m/s}^2$ . Největší napětí bylo tentokrát vypočteno na zadních ramenech, blíže ke krytům motorům. Hodnota Von Misesova napětí je zde  $2,52 \text{ MPa}$ , tato hodnota se ani zdaleka nepřibližuje dovoleným napětím uhlíkového kompozitního materiálu. Materiál tedy vyhovuje dané aplikaci.



Obr. 58 Místo maximálního napětí při manévrování koptéry

Opět byly zjištěny hodnoty napětí v kritických místech plastových dílů. Ani v téhle situaci nebyla překročena hranice dovoleného napětí  $26 \text{ MPa}$ , ale napětí se v nejrizikovějších místech pohybuje jen okolo  $1,58 \text{ MPa}$ . Koptéra tedy z pevnostního hlediska vyhovuje všem zkoumaným situacím.

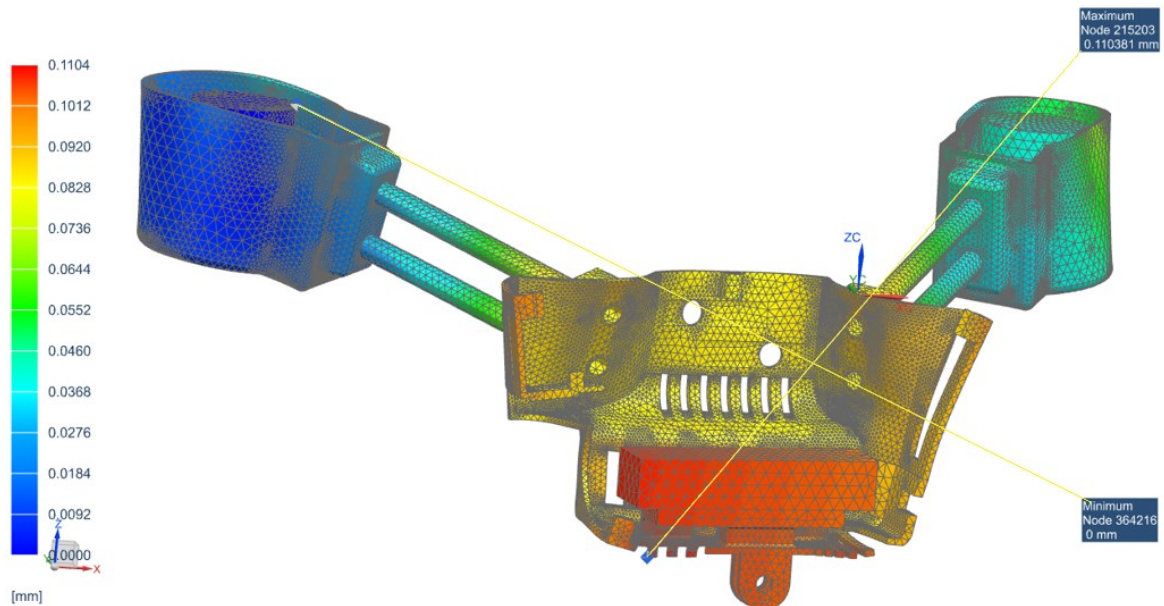


Obr. 59 Napětí v kritických místech při manévrování s koptérou



### 13.6 Deformace koptéry HERO

Další informací, která byla získaná ze simulací mechanického namáhání, byla deformace. Deformace modelu byla zkoumána ve všech situacích. Vzhledem k tomu, že hodnota deformace byla ve všech třech situacích téměř totožná, bude zde uvedena pouze třetí situace, kdy byla zjištěná deformace nejvyšší. Průběh deformace je zobrazen na následujícím obrázku, aby bylo možné deformaci zpozorovat, je zde uvedena ve zvětšeném měřítku.



Obr. 60 Simulace deformace počítačového modelu koptéry HERO

Největší hodnota deformace byla zjištěna 0,11 mm, a to ve spodní části koptéry. Největší deformace je v tomto místě pravděpodobně způsobena tíhou baterie a kamery. Tyto dvě součástky váží téměř 230 g a to je značná část celé váhy koptéry. Na druhou stranu nejnižší deformace 0 mm, byla zjištěna v místech, kde se nacházejí motory. Hodnoty deformací jsou zanedbatelné a neměly by způsobovat žádné problémy při letu, nebo manévrování s koptérou.

## 14 VÝROBA KOPTÉRY HERO

Jako první byly zakoupeny trubky z uhlíkového kompozitního materiálu. Na ramena byly zvoleny trubky o vnějším průměru 7 mm a vnitřním průměru 5,5 mm. Délka předních ramen byla zvolena 94 mm a délka zadních ramen byla zvolena 86 mm. Na přistávací nožky byly zvoleny trubky o vnějším průměru 5 mm a vnitřním průměru 3 mm. Délka přistávacích nožek byla zvolena 101 mm.



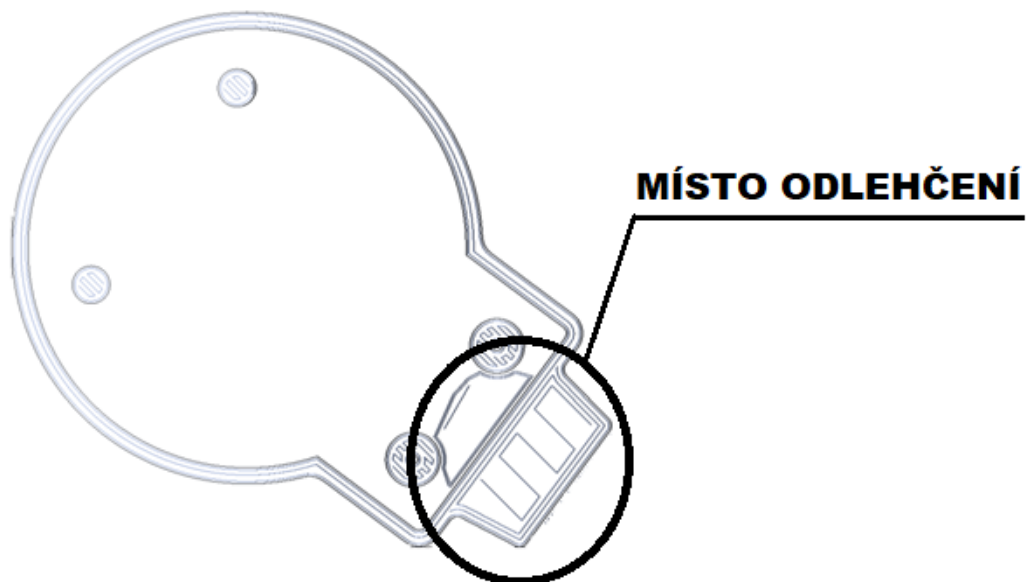
Obr. 61 Trubky z uhlíkového kompozitního materiálu

Dalším krokem výroby bylo vytištění plastových součástek nové koptéry. Tisk probíhal na tiskárně Fortus 900mc. Tato tiskárna využívá pro tisk technologii FDM a nejtenčí vrstva, kterou tato tiskárna zvládne nanést je 0,178 mm. Zvoleným materiálem pro tisk byl ABS M30, který se vyznačuje hlavně vyšší pevností v ohybu, tahu a rázu. Nevýhodou tiskárny je již doporučená tloušťka stěny výtisku, která je u rovných stěn 1,7 mm a u zaoblených 2,5 mm.



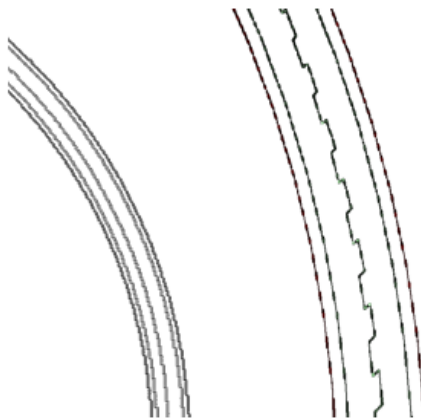
Obr. 62 3D tiskárna Fortus 900mc

Tisk může být proveden ve dvou různých variantách. Při definování tisku lze vybrat možnost tzv. odlehčeného tisku. Při odlehčeném tisku nejsou tlusté stěny zcela vyplněny materiálem, ale tiskárna zde vytvoří tvar voštin. To vede k tomu, že se sníží celková hmotnost modelu, ale zároveň se sníží tuhost celého vytištěného dílu. Princip odlehčeného tisku je na následujícím obrázku, kde znázorněné křivky reprezentují tištěné vrstvy.



Obr. 63 Princip nanášení vrstev u tisku odlehčených modelů

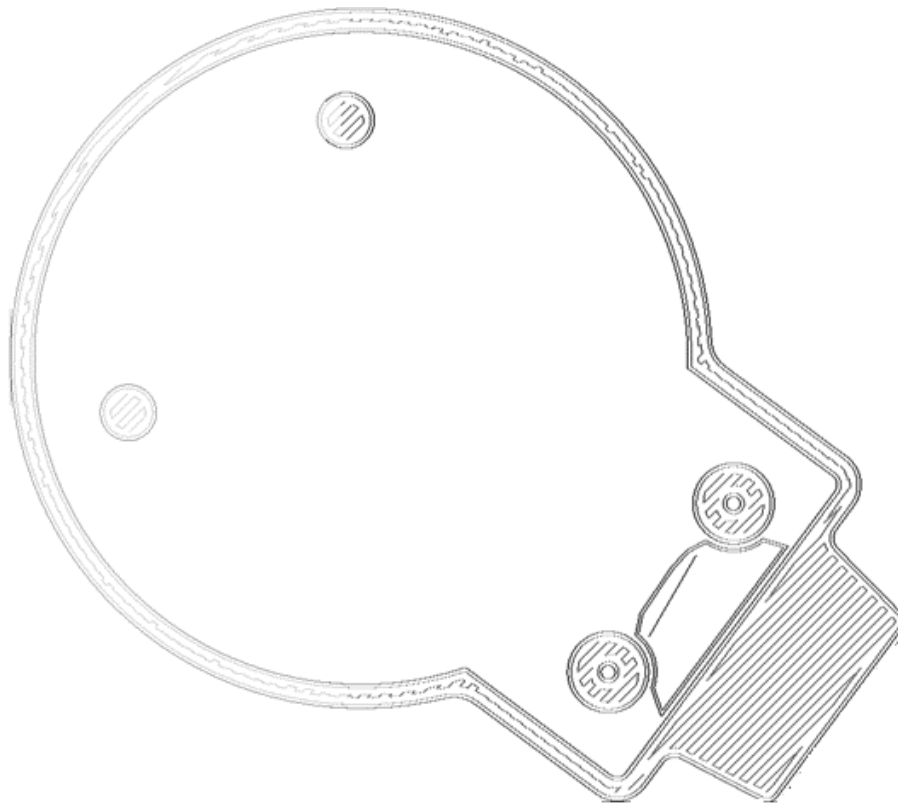
Při tisknutí zmíněnou metodou by byl objem spodního krytu motoru snížen z  $27,3 \text{ mm}^3$  na  $24,3 \text{ mm}^3$ . To by vedlo ke snížení hmotnosti z 28,5 g na 25,4 g. Vzhledem k tomu, že budou vyrobeny 4 kryty, byla by celková ušetřená hmotnost na těchto součástkách 12,4 g. U odlehčeného tisku se navíc změní i princip nanášení vrstev tenčích stěn a zmenší se soudržnost jednotlivých vrstev. Porovnání principu tisku odlehčené a neodlehčené tenké vrstvy je znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 64 Odlehčený tisk (vlevo) a klasický tisk (vpravo)

Problém u odlehčených dílů je tedy již zmíněný pokles tuhosti, ale také i velmi obtížné nadefinování vlastností materiálů do simulací mechanického namáhání. Navíc by byla voštinová konstrukce provedena v místech, kde jsou spojeny jednotlivé kryty uhlíkovými kompozity. V těchto místech bylo zjištěno nejvyšší napětí na modelu a při odlehčení těchto míst by mohlo dojít k porušení materiálu při manévrování koptéry.

Kvůli uvedeným důvodům byl tedy zvolen klasický tisk, kdy jsou materiálem maximálně vyplněna všechna místa modelu. Díky tomu bude dosaženo nejvyšší možné tuhosti a soudržnosti jednotlivých vrstev. Navíc je již model dostatečně odlehčen, takže by měl fungovat správně i při vyištění dílů klasickou metodou. Princip nanášení tištěných vrstev klasickou metodou je na obr. 65.

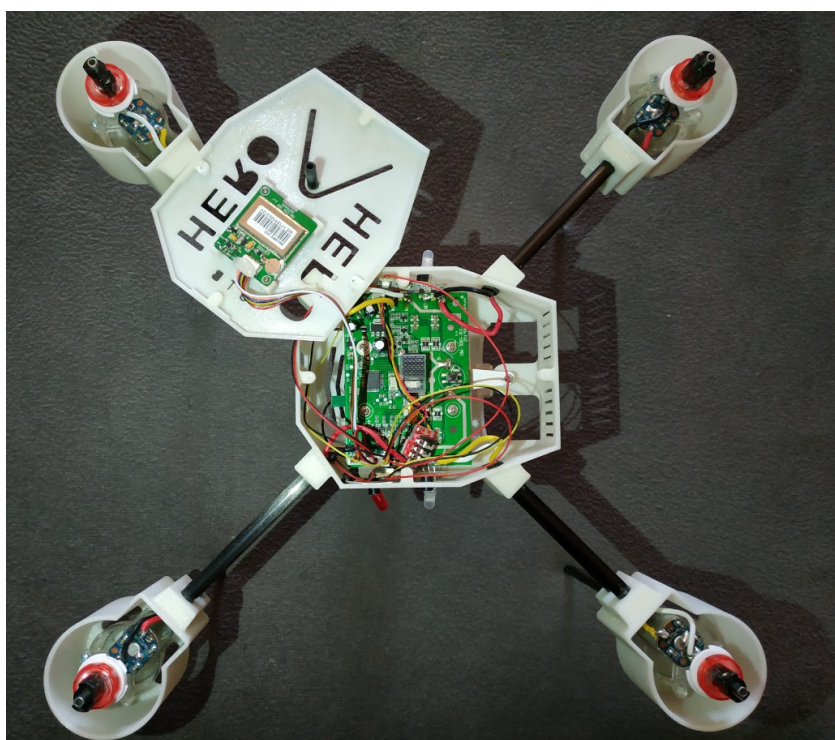


Obr. 65 Princip nanášení vrstev klasického tisku

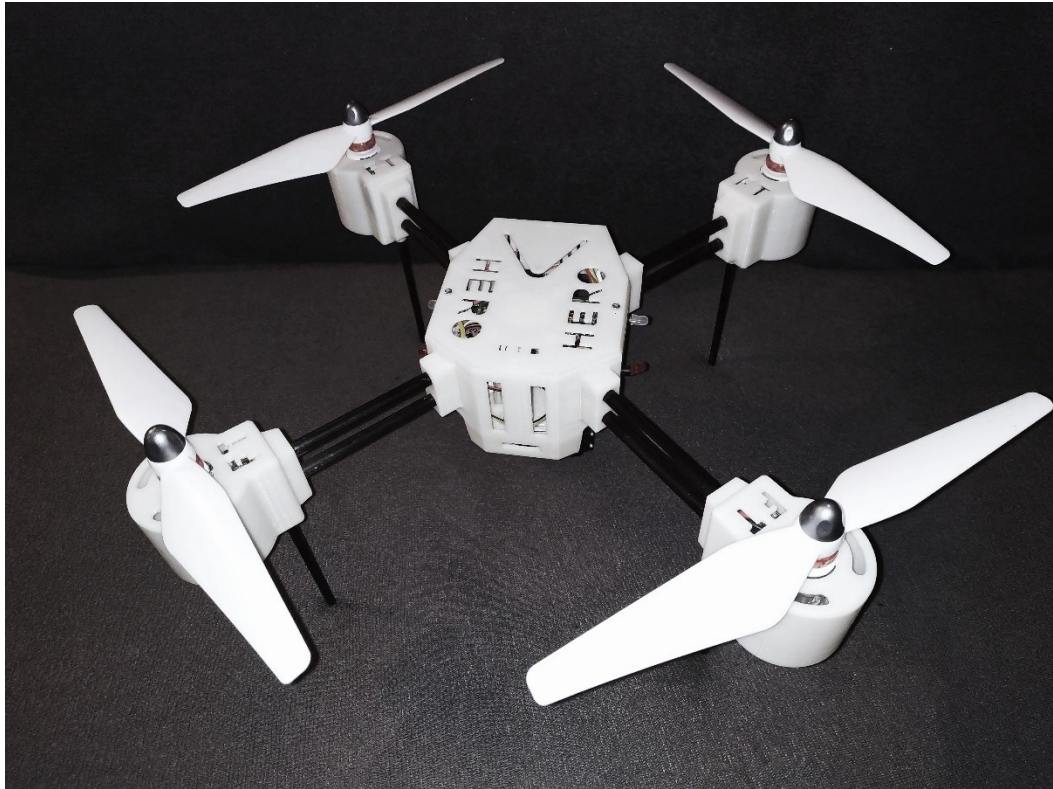


Obr. 66 Vytisknuté součástky

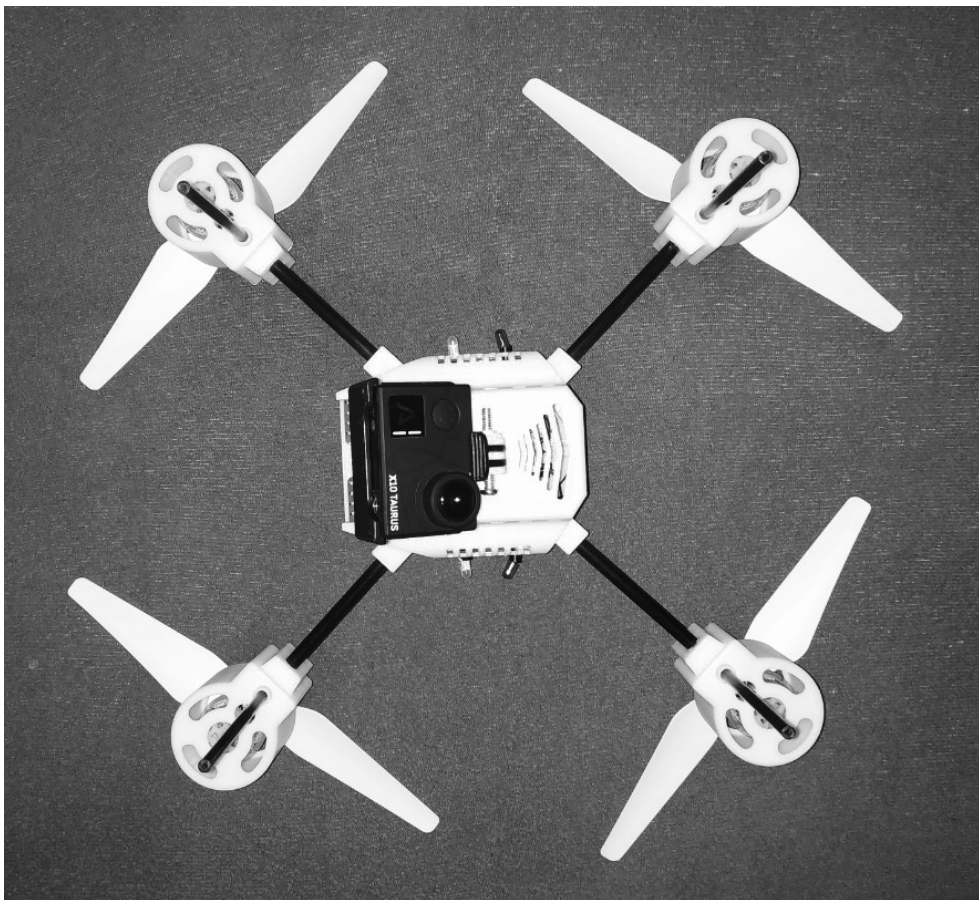
Po vytisknutí veškerých součástí následovalo zkompletování koptéry. Jako první byly propojeny spodní plastové kryty uhlíkovými trubkami. Následně byly za pomoci pájky odstraněny vodiče motorů ze základní desky. Následovalo upevnění motorů a základní desky do spodních krytů. Po upevnění součástí následovalo protažení vodičů jednotlivými rameny koptéry, a to od motorů směrem k základní desce. Vodiče byly opět připájeny k základní desce a byly připevněny horní kryty motorů a horní kryt základní desky. Posledními kroky kompletace koptéry HERO bylo připevnění přistávacích nožek a držáku s kamerou.



Obr. 67 Pohled na elektroniku uloženou v novém krytu



Obr. 68 Horní pohled na koptěru HERO



Obr. 69 Spodní pohled na koptěru HERO

## 15 TESTOVÁNÍ KOPTÉRY HERO

V této kapitole jsou popsány kroky, které následovaly po sestavení prototypu kvadrokoptéry HERO. Nejdříve probíhalo několik testovacích letů a následně bylo pořízeno několik snímků, které byly vyhodnoceny. V poslední části této kapitole bylo provedeno finanční zhodnocení celého projektu.

### 15.1 První testovací lety

Před prvním letem bylo nutné zkalibrovat veškeré součástky koptéry HERO. Nejprve byl zkalibrován barometr, aby byla koptéra schopná sama držet zvolenou výšku. Následovala kalibrace GPS modulu, po jejím dokončení je možné používat zmíněné funkce jako je například automatický návrat na místo vzletu. Kalibrace všech součástí proběhla bez problémů. Po dokončení kalibrace byl proveden první testovací let bez připevněné kamery, aby nedošlo k jejímu poškození v případě jakýchkoliv problémů.



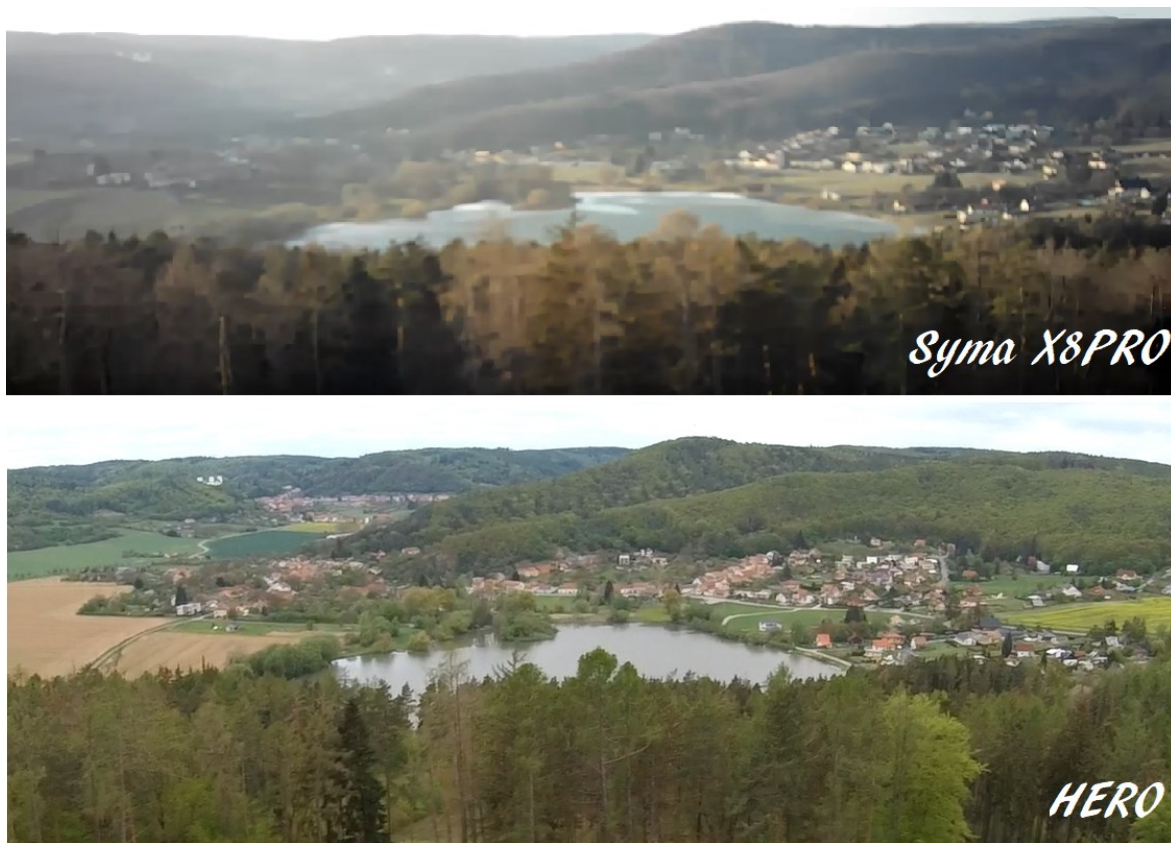
Obr. 70 Fotografie z prvního testovacího letu koptéry HERO

Při letu nebyly zpozorovány žádné negativní jevy, jako je například nekontrolovatelné zatačení koptéry, nebo samovolné stoupání koptéry, kvůli nižší hmotnosti modelu. Řízení fungovalo správně a první let tedy probíhal bez problémů.

Po úspěšném prvním letu byla na koptéru HERO připevněna akční kamera Lamax X10 Taurus. S kamerou Lamax je koptéra HERO o 40 g těžší, než koptéra Syma X8 PRO se starou kamerou. Tato skutečnost se může projevit na vyšším opotřebením motorů, nebo na kratší výdrži baterie koptéry. Po absolvování prvního letu s připevněnou kamerou nebyly opět zpozorovány žádné negativní jevy při manévrování.

## 15.2 Vyhodnocení snímků z nové kamery

S novou kamerou se kvalita pořízených snímků výrazně zvýšila. Díky elektronické stabilizaci jsou videa mnohem stabilnější oproti záběrům staré kamery. Porovnání kvality snímků staré a nové kamery je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr. 71 Porovnání kvality snímků z koptéry Syma X8PRO a koptéry HERO

Oba snímky byly vytvořeny na stejném místě, aby bylo posouzení zlepšení kvality co nejvíce snadné a objektivní. Nová kamera je díky vyššímu rozlišení schopná rozlišit mnohem více detailů, než kamera původní.



Nová kamera má úhel záběru až  $170^\circ$ , to s sebou nese jednu nevýhodu. V případě nastaveného maximálního úhlu záběru, se na snímcích objevuje jev zvaný rybí oko. Tento jev je dobře vidět na obr. 72, kde jsou v záběru ohnuté přistávací nožky, které jsou ve skutečnosti rovné.



Obr. 72 Přistávací nožky koptéry v záběru kamery



Obr. 73 Upravený snímek bez přistávacích nožek

Přesto že byly přistávací nožky navrženy dále od sebe, jsou na záběrech s nastaveným maximálním úhlem záběru vidět. Tato skutečnost se dá řešit snížením úhlu záběru kamery, to ale vede ke snížení rozlišení pořízených snímků. Další možností je ořezat získaný obraz tak, aby na něm nožky vidět nebyly. Příklad řešení přistávacích nožek v záběru pomocí ořezání, je uveden na obr. 73.

Dalším výrazným zlepšením je tedy již zmíněný úhel kamery  $170^\circ$ . U staré kamery byl úhel záběru pouhých  $90^\circ$ . Tento fakt byl z části kompenzován tím, že poloha čočky kamery byla pohyblivá. Pohyb kamery bylo možné řídit přímo z vysílačky, ale pouze ve vertikálním směru. I s pohyblivou čočkou nebyla stará kamera schopna zabrat tak velkou plochu, jako kamera Lamax. Na posledním obrázku této práce je znázorněn rozdíl v úhlu záběru čočky obou kamer. Fotografie jsou zde zobrazeny v maximálním možném rozlišení, které obě kamery dokážou.



Obr. 74 Porovnání úhlu záběru obou kamer na snímku ze stejného místa

Je zde vidět velký rozdíl, protože snímky jsou pořízeny z výšky asi 30 m a díky tomu je na snímku zabraná velká plocha. Právě kvůli možnosti fotit objekty z výšky je velmi výhodné použít kameru s velkým úhlem záběru. Umožní to získat mnohem kvalitnější záběry, které autorovi nabízí velkou škálu možností, jak s nimi dál pracovat.

### 15.3 Finanční zhodnocení

Tištěné díly koptéry HERO mají hmotnost 182 g. Toto číslo je ještě nutné vynásobit koeficientem 1,6. Tento koeficient navýší zmíněnou hmotnost na 291 g a tato hmotnost odpovídá tištěným dílům spolu s podpurným materiálem. Cena 1 g použitého materiálu je 8,- Kč, tato cena je vyšší kvůli použití kvalitního materiálu ABS a profesionální tiskárny. V domácích podmínkách by bylo možné tisknout s náklady 1,- Kč na gram materiálu. Vytištění krytu koptéry HERO tedy stálo 2 328,- Kč. K této ceně je nutné přičíst ještě 350,- Kč, to je cena za kompozitní materiál, který tvoří ramena a přistávací nožky koptéry. Další položkou, kterou je nutno přičíst k výsledné ceně, jsou použité funkční součástky a vysílačka koptéry. Samostatný nákup těchto součástek by vyšel na 3 500,- Kč. Po sečtení těchto částek se dostáváme na 6 178,- Kč, tato cena odpovídá hodnotě nového prototypu kvadroptéry HERO. V poslední řadě je nutné přičíst 5 000,- Kč, které byly investovány na nákup nové akční kamery Lamax spolu s bohatým příslušenstvím. Výsledná cena koptéry i s kamerou je tedy 11 178,- Kč.

Vzhledem k tomu, že je koptéra HERO schopná pořizovat snímky v rozlišení 4K. Může se tímto parametrem rovnat některým koptérám např. od zmíněné značky DJI. Cena dronů vybavených 4K kamerou od společnosti DJI začíná od 25 000,- Kč. Velkou výhodou oproti koptéře HERO mají v tom, že bývají navíc osazeny gimbaly, díky kterým je možné pořizovat ještě stabilnější videa. Jako jednu z hlavních nevýhod by se dala brát právě absence gimbalu u koptéry HERO. Tato nevýhoda je ale z části kompenzována zmíněnou funkcí elektronické stabilizace EIS, kterou kamera disponuje. Navíc tyto drony vyšší cenové třídy bývají osazeny součástkami z kvalitnějších materiálů a díky několikaletému vývoji mají často velmi kvalitní zpracování.

Koptéra HERO může bez problémů konkurovat koptérám, které se pohybují v nižší cenové kategorii např. koptéře Parrot Bebop 2. Cena této koptéry se dnes pohybuje kolem 13 000,- Kč. Koptéra disponuje stejnými pomocnými funkcemi jako koptéra HERO, takže je schopna např. sama přistát na místo vzletu. Při porovnání kamer je zde velký rozdíl. Kamera koptéry Parrot je schopna pořizovat snímky maximálně v rozlišení FullHD, nedisponuje žádnou stabilizací a navíc ji nelze použít samostatně bez koptéry. Všechny tyto parametry převyšuje kamera koptéry HERO. Videa pořízené koptérou HERO by tedy měla být stabilnější, mohou být pořízeny v rozlišení 4K a navíc je zde možnost využití kamery bez nutnosti použití koptéry.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření funkčního prototypu kvadrokoptéry, která je schopna pořizovat snímky ve vysokém rozlišení. Nejprve tedy byla zakoupena koptéra značky Syma, konkrétní model Syma X8PRO. Tato koptéra již kamerou disponuje, ale bohužel snímky z ní pořízené byly velmi nekvalitní. Kvalitnější kamera měla vyšší hmotnost, než by Syma X8PRO mohla unést. Proto tedy byla za pomoci reverzního inženýrství zkonstruována nová kvadrokoptéra, která je schopná unést kvalitnější kameru a tím pádem pořizovat snímky ve vyšším rozlišení.

Nejprve byly ze zakoupené koptéry vyjmuty všechny funkční součástky, jako je základní deska, baterie a motory spolu s vodiči. Tyto součástky byly vymodelovány v softwaru Catia. Na tyto součástky bylo navrženo několik krytů, ze kterých byl jeden vybrán. Vybraný kryt byl následně odlehčen tak, aby bylo možné vzletět i s novou kamerou.

Počítačový model koptéry byl před samotným vyrobením testován v softwaru, který je určen pro simulace mechanického namáhání. Model byl nejprve testován v situaci kdy pouze „visí“ ve vzduchu a není prováděn žádný manévr. Následně v situaci, kdy stoupá vzhůru. Jako poslední byla situace, kdy dron stoupá vzhůru a zároveň se pohybuje do strany. Největší hodnoty napětí na plastových dílech byly vždy kolem míst, ve kterých jsou upevněna ramena z uhlíkového kompozitního materiálu. Ve všech situacích vypočtené napětí nepřesahovalo dovolené napětí použitých materiálů, takže koptéra vyhovuje daným situacím.

Následně byla koptéra vyrobena a byla pojmenována HERO. Výroba plastových dílů probíhala na 3D tiskárně technologií FDM. Následně byly zakoupeny trubky z uhlíkového kompozitního materiálu, ze kterého jsou ramena a přistávací nožky koptéry. Po vytištění dílů byly do nového krytu ukotveny všechny funkční součástky a vodiče byly protaženy rameny koptéry.

Po sestrojení koptéry následovaly první testovací lety, kdy bylo pozorováno, jak se koptéra chová za letu a zda bylo vše provedeno správně. Při testovacích letech nebylo upozorováno žádné nezvyklé chování koptéry. Následovaly lety s připevněnou kamerou, která je schopná pořizovat snímky ve vysokém rozlišení. Byla vybrána kamera Lamax X10 Taurus. Při testovacích letech opět nebylo upozorováno žádné nezvyklé chování koptéry. Aby bylo snadné porovnat kvalitu pořízených snímků z koptéry Syma a HERO, bylo pořízeno několik snímků ze stejného místa. Tyto snímky jsou uvedeny a porovnány v poslední kapitole této práce, kde byla zároveň provedena cenová analýza celého projektu.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] *Engineersatwar: Flexing Fledgling Wings at Farnborough* [online]. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <http://engineersatwar.imeche.org/features/royal-aircraft-factory>
- [2] *SCIENCE mag: Historie dronů aneb Bezpilotní letouny v dějinách* [online]. Nitemedia, 2018 [cit. 2018-10-02]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/historie-dronu-aneb-bezpilotni-letouny-v-dejinach/>
- [3] MIŠÁK, Petr. Kvadrokoptéra nebo octooptéra?. *Droni.cz* [online]. droni, 2015, 20.7.2015 [cit. 2018-10-09]. Dostupné z: <https://www.droni.cz/kvadrokoptera-octooptera-dron/>
- [4] *DRONE select: GD-X8 FOLDABLE FRAME KIT 900MM* [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <http://dronesselect.com/quadrocopter/gd-x8-foldable-frame-kit-900mm/>
- [5] PLACHÝ, Jan. *Stavba trikoptyry*. Havlíčkova 426, Česká Lípa, 2017. Ročníková práce. Střední průmyslová škola, Česká Lípa.
- [6] DRONICZ. Kvadrokoptéra nebo octooptéra? Proč je počet vrtulí důležitý a kdy je na škodu?. *Droni.cz*. [online]. 20.7.2016 [cit. 2016-07-30]. Dostupné z: <https://www.droni.cz/kvadrokoptera-octooptera-dron/>.
- [7] SMASHINGDRONES. Hexacopters, Quadcopters and Octocopters – What is the Difference? *SmashingDrones.com*. [online]. 21.10.2015 [cit. 2016-07-30]. Dostupné z: <http://smashingdrones.com/hexacopters-quadcopters-and-octoopters-what-is-the-difference/>
- [8] FORD, Justin. *Best Hobby Drones: Top 6 Hobbyist Drones Reviewed* [online]. 2017, , 5 [cit. 2018-10-23]. Dostupné z: <https://www.dronethusiast.com/best-hobby-drones/>
- [9] KASÍK, Pavel. *Sport budoucnosti, při kterém se ani nepohnete*. [online]. idnes, 2017, 6.9. 2017, , 7 [cit. 2018-10-23]. Dostupné z: [https://technet.idnes.cz/jan-mittner-zavody-drony-drone-racing-d89-/tec\\_tecnika.aspx?c=A170903\\_153955\\_tec\\_tecnika\\_pka](https://technet.idnes.cz/jan-mittner-zavody-drony-drone-racing-d89-/tec_tecnika.aspx?c=A170903_153955_tec_tecnika_pka)
- [10] *DRONE CHAMPIONS LEAGUE*[online]. [cit. 2018-10-23]. Dostupné z: <https://www.dcl.aero/>
- [11] *DRONPRO: Drony s kamerou, bez kamery, RC, profi* [online]. Praha: DronPro.cz, 2017 [cit. 2018-10-23]. Dostupné z: <https://dronpro.cz/drony-s-kamerou-rc-profi/>
- [12] *DRONEWEB: Civilní drony* [online]. Droneweb.cz, 2015 [cit. 2018-10-23]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz>

- [13] *DRONENERDS* [online]. [cit. 2018-10-23]. Dostupné z: <https://www.dronenerds.com/products/drones/enterprise-drones/argas-mg-1s/dji-agras-mg-1s-octocopter-agriculture-drone-craft-only-mg1s-craft-dji.html>
- [14] *Militaryfactory: Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk* [online]. 2017 [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: [https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft\\_id=40](https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=40)
- [15] HOUSKOVÁ, Silvie. Británie vyvíjí špionážní drony ve velikosti vážky. Do moderních zbraní a výzkumu investuje stovky milionů. *Hospodářské noviny*. *Economia*, 2018, , 2. ISSN 1213-7693.
- [16] *TORBOSQUID: Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk Aircraft 3D model* [online]. [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <https://www.turbosquid.com/3d-models/northrop-grumman-global-3d-model-1202352>
- [17] HEGER, Lubomír. Dronobití na obzoru: Čína šíří bojové drony s naváděnými střelami. *EURO* [online]. 14. dubna 2017, , 5 [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <https://www.euro.cz/politika/dronobiti-na-obzoru-cina-siri-bojove-drony-s-navadenymi-strelami-1341550>
- [18] URBÁNEK, Aleš. *KONTROLA SOUČÁSTÍ POMOCÍ METOD REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. JAN ZOUHAR.
- [19] *MCAE: Reverzní inženýrství* [online]. 664 34 Kuřim, Brno - venkov: MCAE SYSTEMS, 2017 [cit. 2017-01-24]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/>
- [20] *3Dees: 3D skenování* [online]. [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/3d-skenovani>
- [21] BOEHLER, W. *3D Scanning Instruments* [online]. [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://scanning.fh-mainz.de>
- [22] *Vvautomotive: VYFOTIT ZE VŠECH STRAN, PROSÍM* [online]. [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <http://www.vvautomotive.cz/vyfotit-ze-vsech-stran-prosim/>
- [23] *Technodat: 3D optické skenování* [online]. třída Tomáše Bati 3295, 76001 Zlín: CAE - systémy [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://www.technodat.cz>
- [24] *Merici-pristroje: QuantumS FaroArm* [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.merici-pristroje.cz/merici-rameno/>
- [25] BORGHESE, Nunzio Alberto, et al. Autoscan: A flexible and portable 3D scanner. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1998, 18.3: 38-41.
- [26] PRŮŠA J. a PRŮŠA M. *ZÁKLADY 3D TISKU*. Prusa Research s.r.o., 2014, dostupné také z WWW: <http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>

- [27] JACOBS, Paul F. *Stereolithography and other RP&M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling*. Society of Manufacturing Engineers, 1995.
- [28] *Machinedesign: 3D Printing: The Machine that Started It All* [online]. 2017 [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing/3d-printing-machine-started-it-all>
- [29] KEREČANINOVÁ Z. a ŘASA J. Nekonvekční metody obrábění 9. díl: Rapid Prototyping. *Inovace* [online]. 2008, str. 50 [cit. 2016-10-30]. DOI: 081127. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [30] *Maas: 3D Printing and the Open Source Movement* [online]. 2017 [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <https://maas.museum/inside-the-collection/2017/09/26/3d-printing-and-the-open-source-movement/>
- [31] VÍT, Tomáš. Stolní 3D tiskárny od deseti tisíc korun. *Konstruktér*. Bašty 413/2, 602 00 Brno: Nová média, s.r.o., 2015, 2.(2/2015), 6. ISSN 1805-8590.
- [32] HOMOLA, Jan. Odvážný souboj 3D tiskáren. *Konstruktér*. Bašty 413/2, 602 00 Brno: Nová média, s.r.o., 2015, 3.(3/2015), 1. ISSN 1805-8590.
- [33] *Octave* [online]. 2014 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <https://www.octave.com>
- [34] PRŮŠA J. a PRŮŠA M. *ZÁKLADY 3D TISKU*. Prusa Research s.r.o., 2014, dostupné také z WWW: <http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [35] *EasyCNC* [online]. Purkyňova 1805, 250 82 Úvaly: 4ISP spol. s.r.o., 2016 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [36] HLAWICZKA, Petr. Rychlá výroba prototypů. *FINews*. Active Solutions s.r.o., 2013, , 2. ISSN 2336-260X. Dostupné také z: <http://flnews.autoroad.cz/technika/45427-rychla-vyroba-prototypu-klic-k-intenzivnim-aerodynamickym-programum-v-fl-video>
- [37] *Autorad* [online]. Active Solutions s.r.o, 2015 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <http://autoroad.cz/pictures/article/2013/09/13/1379070934-hdd.png>
- [38] CUSTOMPART.NET [online]. c2009 [cit. 2011-03-21]. Technologies. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- [39] *3D-tisk* [online]. Nová média, s.r.o., 2014 [cit. 2017-1-11]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
- [40] *Blog.nus.edu: Polyjet* [online]. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <http://blog.nus.edu.sg/u0804594/common-rp-techniques/e-polyjet/>

- [41] *Objet* [online]. Tecnotrade obráběcí stroje, 2015 [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy>
- [42] SEKERÁK, Martin. *Návrh a výroba ergonomické myši*. Zlín, 2017. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Vojtěch Šenkeřík, Ph.D.
- [43] *Istrojirenství: Snižování výrobních nákladů pomocí Autodesk® Moldflow®* [online]. SMARTPLAST [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/it/precist.php?navez=snizovani-vyrobnich-nakladu-pomoci-autodesk-moldflow-analyzy&id=21>
- [44] *SIEMENS: NX* [online]. USA [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>
- [45] *Harveynorman: GoPro Hero 7 - Black* [online]. 2018 [cit. 2018-11-27]. Dostupné z: <https://www.harveynorman.com.my/cameras-printers-and-ink/cameras/gopro-en-2/gopro-hero-7-black.html>
- [46] *Avnavody* [online]. BKC-Game.net, 2017 [cit. 2018-11-27]. Dostupné z: [http://www.avnavody.cz/?sekce=vrch\\_jaknaav-formatrozliseni](http://www.avnavody.cz/?sekce=vrch_jaknaav-formatrozliseni)
- [47] *Digitální kamery: Stabilizace OIS vs EIS* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.digitalnikamery.com/news/elektronicka-vs-opticka-stabilizace-gyroskop-vs-eis/>
- [48] *Uživatelská příručka ATOS II/II SO Hardware, 2. vydání 2008. 62 s.*



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

3D	Trojrozměrný, trojdimenzionální;
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren;
CAD	(Computer Aided Design) Počítačem podporovaný návrh;
CAE	(Computer Aided Engineering) Počítačem podporované inženýrství;
CAM	(Computer Aided Manufacturing) Počítačem podporované obrábění;
CNC	(Computer Numerical Control) Počítačem řízen stroj;
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý;
EIS	Elektronická stabilizace obrazu;
FDM	(Fused Deposition Modeling) Tisk modelů roztaveným polymerem;
FOV	(Field of view) Úhel záběru;
FPS	(Frame per second) Počet snímků za sekundu;
GHz	Gigahertz;
GPS	(Global Position System) Globální polohový systém;
HD	(High – definition) Vysoké rozlišení;
km	Kilometr;
m	Metr;
mAh	Miliampérhodina;
mm	Milimetr;
Mpx	Megapixel;
OIS	Optická stabilizace obrazu;
PLA	(Polyactid acid) Polyaktid;
SLA	(Stereolitography) Tisk za pomoci ultrafialového laseru;
SLS	(Selective Laser Sintering) Tisk za pomoci selektivního spékání laseru;
UV	(Ultraviolet) Ultrafialové;

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Konstruování prvního dronu Aerial Target [1].....	12
Obr. 2 Schematicky znázorněné skupiny „koptér“ [3] .....	13
Obr. 3 Konstrukční řešení dronu nesoucí označení „koaxial X8“ [4] .....	13
Obr. 4 Práškovací dron DJI Agras MG-1S [13] .....	16
Obr. 5 Dron Global Hawk RQ-4 [16] .....	17
Obr. 6 Srovnání reverzního inženýrství s klasickým výrobním postupem [18] .....	19
Obr. 7 Princip 3D laserového skenování [21].....	20
Obr. 8 Princip optického skenování skenerem Atos [22] .....	21
Obr. 9 Tiskárna SLA-1 [28].....	23
Obr. 10 RepRap tiskárna Darwin [30] .....	24
Obr. 11 Soutěžní model [31].....	25
Obr. 12 3D tiskárna Zortax M200 [33].....	25
Obr. 13 Výroba modelu technologií FDM/FFF [37] .....	27
Obr. 14 Výroba modelu technologií SLS [38].....	28
Obr. 15 Výroba modelu technologií SLA [38] .....	29
Obr. 16 Výroba modelu technologií PolyJet [40].....	30
Obr. 17 Výrobky vytištěny metodou PolyJet [42] .....	30
Obr. 18 Vliv jednotlivých etap výroby na růst nákladů [43] .....	31
Obr. 19 Druhy sítí (z leva Midplane, Dual Domain, 3D síť) [43] .....	32
Obr. 20 Lokální zmenšení elementů 3D sítě v softwaru NX.....	33
Obr. 21 Akční kamera GoPro Hero 7 [45].....	34
Obr. 22 Syma X8PRO .....	39
Obr. 23 Vysílačka pro Symu X8PRO .....	40
Obr. 24 Obsah balení dronu Syma X8PRO .....	41
Obr. 25 Akční kamera Lamax X10 Taurus.....	42
Obr. 26 Obsah balení kamery Lamax X10 Taurus .....	43
Obr. 27 Syma X8PRO s krabičkou se závažím .....	44
Obr. 28 Princip vychýlení těžiště koptéry .....	45
Obr. 29 Demontovaná Syma X8PRO .....	46
Obr. 30 Použité součástky .....	46
Obr. 31 Popis zařízení ATOS II Triple Scan [48] .....	47
Obr. 32 Skenování optickým skenerem .....	48

Obr. 33 Detail skenování spodního krytu koptéry .....	48
Obr. 34 Princip skládání snímků pomocí referenčních bodů.....	49
Obr. 35 Výsledný obraz získaný skenerem .....	49
Obr. 36 Sestava stejnosměrného motoru .....	50
Obr. 37 Model vrtule .....	51
Obr. 38 Model základní desky .....	51
Obr. 39 Sestava základní desky s držákem, baterií a GPS modulem .....	52
Obr. 40 Model přistávací nohy a signalizační diody .....	52
Obr. 41 Sken obalu s modely součástí .....	53
Obr. 42 Návrh koptéry UFO .....	54
Obr. 43 Návrh koptéry HERO .....	55
Obr. 44 Zúžený kryt koptéry HERO.....	55
Obr. 45 Problematika tvorby zaoblených stěn FDM technologie .....	56
Obr. 46 Model odlehčeného krytu základní desky a baterie.....	56
Obr. 47 Odlehčený model spodního krytu motorů .....	57
Obr. 48 Přední část odlehčené verze koptéry HERO.....	58
Obr. 49 Zadní část odlehčené verze koptéry HERO.....	58
Obr. 50 Model určený pro simulace .....	59
Obr. 51 Vysíťovaný model .....	60
Obr. 52 Vysíťovaný model s definovanými okrajovými podmínkami.....	60
Obr. 53 Příklad zmenšených elementů sítě v kritických místech .....	61
Obr. 54 Maximální napětí při zatížení koptéry gravitací.....	62
Obr. 55 Napětí v rizikových místech koptéry při působení gravitace .....	62
Obr. 56 Maximální napětí při vertikální akceleraci koptéry.....	63
Obr. 57 Napětí v kritických místech při akceleraci .....	63
Obr. 58 Místo maximálního napětí při manévrování koptéry .....	64
Obr. 59 Napětí v kritických místech při manévrování s koptérou.....	64
Obr. 60 Simulace deformace počítačového modelu koptéry HERO .....	65
Obr. 61 Trubky z uhlíkového kompozitního materiálu .....	66
Obr. 62 3D tiskárna Fortus 900mc.....	66
Obr. 63 Princip nanášení vrstev u tisku odlehčených modelů.....	67
Obr. 64 Odlehčený tisk (vlevo) a klasický tisk (vpravo).....	67
Obr. 65 Princip nanášení vrstev klasického tisku .....	68

---

Obr. 66 Vytiskované součástky .....	69
Obr. 67 Pohled na elektroniku uloženou v novém krytu .....	69
Obr. 68 Horní pohled na koptéru HERO .....	70
Obr. 69 Spodní pohled na koptéru HERO .....	70
Obr. 70 Fotografie z prvního testovacího letu koptéry HERO .....	71
Obr. 71 Porovnání kvality snímků z koptéry Syma X8PRO a koptéry HERO .....	72
Obr. 72 Přistávací nožky koptéry v záběru kamery .....	73
Obr. 73 Upravený snímek bez přistávacích nožek .....	73
Obr. 74 Porovnání úhlu záběru obou kamer na snímku ze stejného místa.....	74

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: CD obsahující model kvadrokoptéry, sken krytu výchozí koptéry, soubory analýz mechanického namáhání a diplomovou práci