



Středoškolská technika 2025

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Modelování vrtule kvadrokoptéry

Matěj Laštůvka

Gymnázium Zikmunda Wintra

náměstí Jana Žižky 186, 269 01 Rakovník

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou ročníkovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze ročníkové práce jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.



V Rakovníku dne 13. 12. 2024

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi pomohli při vypracování této ročníkové práce, Mgr. Lukáši Gayerovi, Ing. Tereze Sobolové a první řadě bych chtěl poděkovat Mgr. Vojtěchu Delongovi jakožto vedoucímu mé práce. Tuto práci bych nebyl schopen vypracovat bez podpory mých přátel a blízkých.

Anotace

Tato ročníková práce se zaměřuje na design, funkci a modelování vrtulí dronů. Hlavním cílem je navrhnout a vytvořit vlastní modely vrtulí pro kvadrokoptéru, přičemž následně budou tyto návrhy realizovány pomocí 3D tisku. Práce mimo proces návrhu a výroby obsahuje také testování vytvořených vrtulí. Klíčovou součástí je měření tahu jednotlivých vrtulí a jejich porovnávání. Součástí práce je také optimalizace modelů. Výsledky této práce mohou přispět k pochopení aerodynamických vlastností vrtulí a k jejich efektivnějšímu využití v oblasti kvadrokoptér.

Klíčová slova

Kvadrokoptéra; Vrtule; 3D modelování; 3D tisk

Annotation

This thesis focuses on the design, functionality, and modeling of drone propellers. The main objective is to design and create custom propeller models for a quadcopter, with these designs subsequently realized using 3D printing. In addition to the design and manufacturing process, the work also involves testing the created propellers. A key component is measuring the thrust of individual propellers and comparing the results. The project also includes optimizing the models. The outcomes of this work could contribute to a better understanding of the aerodynamic properties of propellers and their more efficient application in the field of quadcopters.

Keywords

Quadcopter; Propeller; 3D modeling; 3D printing

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Kvadroptéry	7
2.1	Fungování kvadroptéry	7
2.1.1	Základní rotace vrtulí.....	7
2.1.2	Senzory a stabilizace.....	8
2.1.3	Řídicí systém.....	8
2.2	Typy kvadroptér a jejich využití.....	8
2.3	Výhody a nevýhody kvadroptér.....	8
2.4	Historie.....	9
2.5	Vrtule	10
2.5.1	Základní princip fungování vrtule	10
2.5.2	Vrtule podle tvaru	10
3	Návrh reálného modelu vrtule	11
3.1	Blender.....	12
4	Praktická část	12
4.1	Návrh modelu vrtule	12
4.2	Tisk modelu vrtule	13
4.2.1	Vrtule se třemi lopatkami	14
4.2.2	Vrtule se čtyřmi lopatkami	15
4.2.3	Vrtule s pěti lopatkami.....	17
4.3	Příprava měření.....	18
4.4	Průběh měření	19
4.5	Výsledky měření	19
5	Závěr	20
6	Použitá literatura	21
7	Seznam obrázků a tabulek	22

1 ÚVOD

V současné době jsou drony velmi oblíbené mezi modeláři jako koníček, a to díky pokroku v technologiích, jejich cenové dostupnosti a možnosti si drony vyrábět nebo přizpůsobovat v domácích podmínkách. Úlohou vrtulí kvadrokoptér je uvést dron do pohybu směrem vzhůru, v případě že se dron již ve vzduchu nachází, tak ho naklonit a určit trajektorii jeho letu, nebo udržet dron ve stabilní pozici. Vrtule se skládá z lopatek a vytvářejí vztlak a tah. Dále se skládá ze středové části, obvykle obsahuje otvor pro připevnění k motoru. Součástí vrtule je také kořen lopatky, tedy bod mezi lopatkou a středovou částí. Konce lopatek jsou uzpůsobeny tak, aby se snížil hluk vrtule a zlepšila se aerodynamika. Drony, tedy bezpilotní letadla mají široké využití díky své flexibilitě a dostupnosti, jako například dostávání se na těžko dostupná místa, focení, nebo přeprava věcí. V posledních pár letech ceny dronů klesly, roste jejich popularita, stávají se nedílnou součástí moderních technologií a nacházejí stále nové uplatnění v běžném životě. Vzhledem k dostupnosti modelovacích software můžou být drony součástí koníčků jako např. rekreační létání nebo modelářství. Výroba vrtulí bývá cenově dostupná, protože existují různé možnosti 3D tisku, např. FDM, SLA, DLP nebo na 3D tiskárně, každá metoda má své specifické použití, výhody, nevýhody a volba závisí na požadovaném materiálu, rychlosti a ceně. [3, 15]

Hlavním cílem ročníkové práce je zvolit modelovací program, naučit se v něm používat základní nástroje, aby bylo možné vytvořit přesný a funkční model vrtule, tento krok zahrnuje seznámení se s uživatelským prostředím, nástroji pro tvorbu 3D objektů a technikami potřebnými pro tvarování struktur. Zvoleným programem je Blender, protože patří mezi nejdostupnější software, jeho použití je zdarma, pro začátečnické modelování není náročný na použití, má přehledné rozhraní, a navíc lze na internetu nalézt velké množství různých videonávodů. Po vytvoření návrhu exportovat model do formátu kompatibilního s 3D tiskárnou, následně provést tisk s využitím zvoleného materiálu a dodržení specifických parametrů tisku. Pak vrtule otestovat v reálných podmínkách, přičemž cílem testování je ověřit funkčnost návrhu, změřit její účinnost a porovnat, jak počet lopatek ovlivní efektivitu vrtule.

Při konstrukci vlastního dronu je nutné zohlednit, že provoz dronů s určitými technickými parametry často vyžaduje registraci provozovatele nebo absolvování pilotní zkoušky. Tyto kroky jsou nezbytné pro zajištění bezpečnosti a souladu s platnými zákony. Proces registrace obvykle zahrnuje získání unikátního identifikačního čísla, ověření technických specifikací dronu a prokázání splnění bezpečnostních standardů. V některých případech může být požadováno předložení dokumentace o konstrukci dronu nebo inspekce ze strany příslušných orgánů. Tyto požadavky mohou pro modeláře představovat administrativní a technickou náročnost, která může komplikovat jejich možnosti experimentovat a vyvíjet nové technologie. [16]

Téma modelování vrtule kvadrokoptéry jsem si zvolil, protože bych jednou v životě chtěl dosáhnout pracovní pozice dopravního pilota. Rád bych se dozvěděl více o tom, jak fungují kvadrokoptéry a jejich vrtule. V rámci teoretické části bych chtěl zmínit historii kvadrokoptér a něco o nich samotných, zjistit, jak je to s vrtulemi, jaké druhy vrtulí existují, způsoby, jakými

se vyrábí, materiály, ze kterých je možné je vyrobit, jak fungují a kde všude se v dnešní době vrtule využívají.

2 KVADROKOPTÉRY

Kvadrokoptéra je druh bezpilotního letadla, která je tvořena 4 rameny osazenými 4 rotory s vrtulemi. Většinou jsou rotory upořádány do čtvercového, nebo křížového vzoru, díky tomu jsou kvadrokoptéry a všeobecně vícemotorové letouny velmi stabilní a mohou se pohybovat do více různých směrů. Kvadrokoptéry jsou nejrozšířenějším typem dronu, vzhledem k jejich jednoduché konstrukci a dobré manévrovatelnosti. V posledních letech jsou kvadrokoptéry v hojném počtu používány, a to jak mezi profesionály, tak mezi amatéry. [3]

2.1 Fungování kvadrokoptéry

Princip fungování kvadrokoptéry je založen na složité synchronizaci rychlostí jednotlivých rotorů, při čemž každý pár rotorů rotuje opačným směrem, tak jsou síly vyvažovány, což umožňuje stabilní let a provádění manévru. Různé kombinace změn rychlostí rotorů umožňují kvadrokoptéře měnit směr letu, mohou tedy stoupat, klesat, létat do všech směrů ve stejné výšce, nebo se otáčet kolem své vlastní osy. [3]

2.1.1 Základní rotace vrtulí

Kvadrokoptéry jsou vybaveny čtyřmi vrtulemi, přičemž dvě z nich rotují ve směru hodinových ručiček a dvě proti směru hodinových ručiček. Toto uspořádání zajišťuje stabilitu letového režimu a umožňuje ovládání pohybu ve všech osách. Pokud všechny vrtule rotují stejnou rychlostí, vzniká vztlak, který udržuje dron v určité výšce.

Pohyb nahoru a dolů (Vztlak): Pro vzlet ze země, nebo zvýšení výšky se zvýší rychlost všech čtyř vrtulí naráz. Vyšší rychlost vrtulí způsobí větší vztlak, takže se kvadrokoptéra začne pohybovat směrem vzhůru. Naopak v případě, když chce snížit výšku nebo přistát zpět na zem, zpomalí všechny čtyři vrtule, což sníží vztlak a kvadrokoptéra se začne pohybovat směrem k zemi.

Pohyb dopředu a dozadu (Náklon): K pohybu dopředu musí být obě přední vrtule pomalejší než zadní vrtule, kvadrokoptéra nakloní předek směrem dolů a začne se pohybovat směrem dopředu. Pohyb dozadu probíhá opačně, tedy zadní vrtule musí rotovat pomaleji než přední, což způsobí náklon zadní části kvadrokoptéry směrem dolů a začne se hýbat směrem dozadu.

Pohyb do stran (Náklon do stran): Pro pohyb doleva či doprava kvadrokoptéra opět manipuluje s rychlostí vrtulí, například pro pohyb doleva se zpomalí vrtule na levé straně a na pravé se vrtule zrychlí. Pohyb doprava se provádí naopak, se zpomalením pravých a zrychlením levých vrtulí.

Rotace kolem své osy: K tomu, by se kvadrokoptéra otočila kolem své osy, se mění rychlosti vrtulí, které rotují stejným směrem, pro otočení směrem doprava se zvýší rychlost vrtulí

rotujících proti směru hodinových ručiček a sníží rychlost vrtulí rotujících ve směru hodinových ručiček, výsledkem je točivý moment, který způsobí otočení kolem své svislé osy. Při otáčení doleva je to naopak. [7]

2.1.2 Senzory a stabilizace

Aby si dron udržel stabilitu, používá různé senzory, které monitorují její orientaci a rychlost. Patří sem gyroskopické senzory pro zjištění naklonění, akcelerometry při změně pohybu a někdy i GPS moduly k určení přesné polohy, všechny údaje se odesílají do řídicí jednotky, která neustále upravuje rychlost vrtulí, aby dron držel v rovnováze. [8]

2.1.3 Řídicí systém

Řídicí jednotka dronu je centrální elektronický modul nebo také základní deska, která rychle zpracovává informace ze senzorů a příkazy od pilota. Tento systém, který často bývá mikropočítač, přijímá data o poloze a orientaci dronu ze senzorů a zajišťuje, že kvadrokoptéra reaguje rychle a přesně na ovládání. DJI Naza-M V2 je jeden z řídicích systémů, který je oblíbený mezi modeláři, jelikož nabízí snadnou konfiguraci a stabilizaci letu. Dále máme Pixhawk (PX4), tedy univerzální řídicí jednotka, vhodná pro pokročilé aplikace a používá se pro vědecké a průmyslové projekty. [2]

2.2 Typy kvadrokoptér a jejich využití

Hobby drony jsou většinou malé, cenově dostupnější a jednodušeji se ovládají. Používají se pro rekreační létání, nebo je používají začínající fotografové.

Profesionální drony jsou vybaveny kvalitními kamerami, stabilizátory, GPS navigacemi, tyto drony používají hlavně profesionální fotografové a využívají se ve filmařství, nebo na průzkumy terénů a mapování.

Průmyslové drony bývají vybaveny speciálními senzory a termokamerami, jsou používány na inspekce a transport na těžko dostupná místa.

Závodní drony jsou navrženy pro manévrování ve vysoké rychlosti, bývají odlehčené se silnými motory, z tohoto důvodu se používají na závodech dronů. [9, 10]

2.3 Výhody a nevýhody kvadrokoptér

Mezi výhody patří to, že jsou poměrně snadné na ovládání, zároveň jsou při ovládání velmi přesné díky nezávislé kontrole každé vrtule. Jejich výroba je cenově nenáročná, vzhledem k absenci složitějších mechanických prvků, které jsou potřeba u klasických vrtulníků, je jejich konstrukce a údržba snadnější a levnější. Kvadrokoptéry patří mezi nejpoužívanější drony, mají mnoho využití, například při fotografii, při průzkumech, inspekcích, záchranných operacích, nebo je také využívají přepravní společnosti. Kvadrokoptéry bývají lehké, kompaktní, což

usnadňuje jejich přenášení a umožňuje používání v těsných prostorech, kam by se větší drony nebo vrtulníky nevešly.

K hlavním nevýhodám patří jejich omezená kapacita baterií, která jim umožňuje létat jen pár desítek minut na jedno nabití. Jsou dost citlivé na povětrnostní podmínky, takže silnější vítr omezuje jejich ovladatelnost, stabilitu a manévrování, což zvyšuje riziko pádu nebo poškození dronu. Některé drony mohou být hlučnější, tedy vydávat hlasitý zvuk které může působit jako rušivý, zvláště když jsou používány při fotografii nebo filmařství. Vzhledem k jejich malé velikosti mají omezenou nosnost, což znamená že mají omezené množství nákladu, tudíž se nepoužívají pro transport velkých a těžkých předmětů. [10]

2.4 Historie

Historie kvadrokoptér zahrnuje období od prvních pokusů (počátky 20. století) s vícerotorovými vrtulníky až po dnešní moderní drony.

1907: První známý vícerotorový letoun byl *Gyroplane No. 1*, vytvořený francouzským inženýrem Paulem Cornuem. Letoun byl poháněný čtyřmi rotory, ale měl průměrnou stabilitu a jeho let nebyl úplně úspěšný, ačkoliv se dokázal odlepit od země, tak ovládání bylo náročné

1920-1930: V této době začaly pokusy o konstrukci vícerotorových letounů, které už zvládly vertikální vzlet i přistání. Ruský George de Bothezat vytvořil více rotorový vrtulník *De Bothezat* helikoptér pro americkou armádu. Ačkoliv měl šest vrtulí, byl nestabilní a neúčinný, tak byl nakonec projekt ukončen.

1940-1950: Technologie už umožňovala vytvořit první stabilnější vícerotorové vrtulníky. V roce 1956 společnost *Convertawings* vytvořila model *Quadrotor*, který měl čtyři rotory a byl schopen nést větší náklady, ale nebyli spolehliví a těžce ovladatelný, které omezovaly praktické využití. V roce 1958 letecký inženýr Charles Kaman vyvinul vícerotorový vrtulník s dvěma hlavními rotory, což vylepšilo a zjednodušilo ovládání. Ale tento typ vrtulníku však nebyl kvadrokoptéra v dnešním slova smyslu.

1980-1990: Probíhal vývoj elektroniky a prvních modelů dronů.

S přístupem k lepším elektronickým součástkám, senzorů a mikroprocesorů začali inženýři vytvářet první modely dronů s více rotory, Tyto technologie umožnily přesné řízení rychlosti jednotlivých vrtulí a stabilní let.

1990-2000: První kvadrokoptéry řízené mikropočítači se začaly objevovat na univerzitách a v laboratořích, využívaly základní gyroskopy a akcelerometry, což přispělo k lepší stabilitě. V této době se kvadrokoptéry používaly hlavně v rámci výzkumů a pokusů.

2000-2010: V těchto letech vznikaly první komerční drony.

V roce 2006 americká společnost *Draganfly* představila první komerční dron *Dragonflyer X6*, který měl pokročilou stabilitu, byl používán pro letecké snímkování a inspekce. V roce 2009 francouzská společnost *Parrot* uvedla na trh *AR.Drone*, tedy kvadrokoptéra určená veřejnosti, která se dala ovládat pomocí chytrého telefonu. Tento model byl zlomem v dostupnosti kvadrokoptér a byl velmi oblíbený mezi amatéry.

2010-současnost: Celkový rozmach dronů a kvadrokoptér.

2010-2015: Kvadrokoptéry jsou běžně dostupné. Výrobci jako DJI začali vyrábět drony s HD kamerami, GPS navigacemi a pokročilými stabilizačními systémy. Kvadrokoptéry začali být využívány například ve fotografii, kinematografii, záchranných službách a průmyslových inspekcích

2016-současnost: Moderní kvadrokoptéry začali používat technologie, jako jsou senzory pro vyhýbání se překážkám, autonomní řízení a vysoké rozlišení kamer, čím se staly ještě praktičtějšími a použitelnějšími i pro složitější úkony. Drony dnes pokročily natolik, že zvládají mise, jako doručování zásilek nebo kontrolování infrastruktury. Vývoj míří k tomu, že drony budou schopny plnit složité úkony bez zásahu člověka. [4]

2.5 Vrtule

Vrtule je technické zařízení, které umožňuje přeměňovat energii rotačního pohybu na tah, nebo naopak tah na rotační pohyb, umožňují létat ať už dronům, vrtulníkům, nebo letadlům. Fungují na základě aerodynamiky, vytvářejí vztlak a tím umožňují jejich pohyb ve vzduchu. [14]

2.5.1 Základní princip fungování vrtule

Vrtule funguje podobně jako křídlo letadla, ale je navržena pro rotační pohyb, při otáčení vrtule prochází vzduchem, a díky specifickému tvaru svých lopatek vytváří tlakový rozdíl mezi horní a spodní stranou. Tento tlakový rozdíl vytváří vztlak.

Lopatky vrtule mají tvar, který je podobný aerodynamickému profilu křídla, s jednou stranou zakřivenou (horní) a druhou stranou plochou (spodní)

Rotace vrtule způsobuje, že vzduch proudí rychleji po horní straně lopatky než po spodní straně. Podle Bernoulliho principu to způsobuje nižší tlak na horní straně a vyšší tlak na spodní straně, což vytváří vztlak.

Aerodynamika vrtule – vrtule musí být navržena tak, aby měla optimální tvar a úhel náběhu (úhel pod kterým lopatka prochází vzduchem). Pokud je úhel příliš malý, vrtule vytváří méně vztlaku, pokud je úhel příliš velký, dochází k turbulenci a ztrátě účinnosti. [1]

2.5.2 Vrtule podle tvaru

Vrtule má tvar uzpůsobený tomu, k čemu je využívána:

Rovná vrtule má rovné lopatky se stejným profilem po celé délce, jsou jednoduché na výrobu a využívají se primárně na menších a cenově dostupných dronech. Jsou účinné při nízkých rychlostech, ale při vyšších rychlostech mají nízký výkon a při zátěžích jsou méně účinné.

Zkroucená vrtule má lopatky zakroucené tak, že úhel náběhu se mění podél délky lopatky, což optimalizuje vztlak po celé délce lopatky. Oproti rovné vrtuli mají větší výkon a jsou účinnější při vyšších rychlostech, zároveň mají rovnoměrněji rozložený vztlak. Na druhou stranu jsou složitější a nákladnější na výrobu.

Vrtule s proměnnou šířky má lopatky vytvarované tak, že jsou od kořene ke špičce zúžené, což snižuje odpor a zlepšuje aerodynamické vlastnosti. Jsou účinnější při letu, stabilnější a jsou stabilnější, jsou dražší a potřebují být velmi přesně vyvážené.

Vrtule s více lopatkami mají namísto dvou lopatek tři, čtyři nebo více lopatek. Používají se pro drony, které vyžadují větší tah, nebo lepší kontrolu při letu. Při letu jsou stabilnější, lépe se s nimi manévruje a mají vyšší vztlak.

Vrtule se zahnutou špičkou mají speciální tvar na konci lopatky, což zamezuje tvorbě vírů a ztrátám způsobeným vířivým odporem. Jsou méně hlučné, mají snížený odpor a lepší výkon při vysokých rychlostech. Mají velmi náročnou výrobu, a to jak po časové, tak po finanční stránce.

Vrtule s proměnným stoupáním mají možnost měnit úhel náběhu za letu, používá se u větších dronů a helikoptér. Optimalizují výkon v různých fázích letu a lépe se ovládají. Jsou velmi drahé na výrobu a potřebují pokročilou elektroniku

Závodní vrtule mají menší profil lopatky, jsou užší a lehčí. Drony s těmito vrtulemi dosahují vysokých rychlostí a lépe reagují na změny otáček motorů. Naopak při menších otáčkách jsou nestabilní a jsou náročnější na spotřebu energie. [13]

3 NÁVRH REÁLNÉHO MODELU VRTULE

Je známo, že každý model vrtule vychází z původního již existujícího modelu, akorát je více či méně upravený. Při modelování reálného návrhu vrtule je nutno zohlednit několik klíčových aspektů, které ovlivňují vlastnosti aerodynamické či mechanické. Profil lopatek musí být optimalizován pro požadovaný vztlak a minimální odpor vzduchu.

Pro zajištění efektivního proudění musí být úhel náběhu náležitě nastaven. Délka a šířka lopatek ovlivní tah vrtule a její schopnost generovat dostatečný výkon. Zvolený materiál musí být dostatečně pevný a lehký, aby odolal mechanickým zatížením při rotaci, ale zároveň minimalizoval hmotnost. Proto se nejčastěji používají uhlíková vlákna nebo plasty.

Aby nedocházelo k vibracím a nadměrnému opotřebení motoru, musí být vrtule dokonale vyvážená. Konstrukce musí odolat odstředivým silám při maximálních provozních otáčkách. Je také nutné zohlednit podmínky, jako je teplota, vlhkost, prach nebo jiné vlivy, které mohou ovlivnit materiál a výkon.

Design by měl minimalizovat aerodynamický hluk, což je důležité zejména v civilních nebo městských oblastech. Velikost vrtule, počet lopatek a tah musí být sladěny s výkonem motoru. Potřebný výkon k uvedení vrtule do požadovaného pohybu musí odpovídat limitům, aby nedocházelo k přetěžování baterie či motorů.

Po vytvoření návrhu je třeba model otestovat a optimalizovat pomocí simulací a fyzických zkoušek. Na základě testů je potřeba návrh modelu upravit pro dosažení požadovaného výkonu. Je také potřeba zamezit selhání během provozu.

Je nutné zajistit, že vrtule bude splňovat platné normy a regulace, například z hlediska velikosti, hlučnosti nebo použitého materiálu. Celkově je při návrhu vrtule nezbytné propojit teoretické znalosti s praktickými požadavky. [11]

3.1 Blender

Blender je open-source software, jehož hlavní funkce zahrnují 3D modelování, animace, nebo rendering. Mezi nástroje pro modelování patří klávesové zkratky pro rychlý postup, podpora polygonů, posun, slučování nebo rozpouštění hran, nebo je zde možnost naprogramovat si vlastní nástroje a doplňky v Pythonu. Modifikátory v Blenderu umožňují automaticky aplikovat různé operace na objekt, aniž by došlo k trvalým změnám jeho základní geometrie. Lze díky nim jednoduše vytvářet efekty, které by jinak vyžadovaly zdlouhavé manuální úpravy. Používá se zejména v oblasti počítačové grafiky, herního vývoje, tvorbu filmů, motion design, nebo za účelem vzdělávání a výzkumu. [12]

4 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části své ročníkové práce jsem se rozhodl vytvořit v prostředí Blender alespoň tři modely vrtulí, které budou mít shodné parametry, lišit se však budou počtem lopatek. Pro výrobu vrtule jsem se rozhodl využít 3D tisk metodou FDM, která je časově i cenově dostupná. Dále jsem měřil tah jednotlivých vrtulí upevněných k motůrku s vysokým točivým momentem a porovnával získaná data.

4.1 Návrh modelu vrtule

Na začátku jsem vytvořil tělo vrtule z válce, ke kterému jsem následně jednoduchým způsobem připojil požadovaný počet lopatek. Poté jsem přidal ochranný rám, který zajišťuje stabilitu a pevnost vrtule.

Pro všechny vrtule jsem zvolil shodné parametry, které zahrnovaly vnější průměr 120 mm, celkovou výšku 12 mm, výšku lopatky 2 mm a úhel náběhu 22°. Tímto způsobem jsem zajistil jednotnost mezi jednotlivými modely, což umožnilo efektivní porovnání její tahu při testování.

Zvolený postup byl u všech tří vrtulí stejný, vytvořil jsem model a v prostředí Blender jsem jej exportoval do souboru kompatibilního s 3D tiskárnou, v mém případě do formátu stl.

4.2 Tisk modelu vrtule

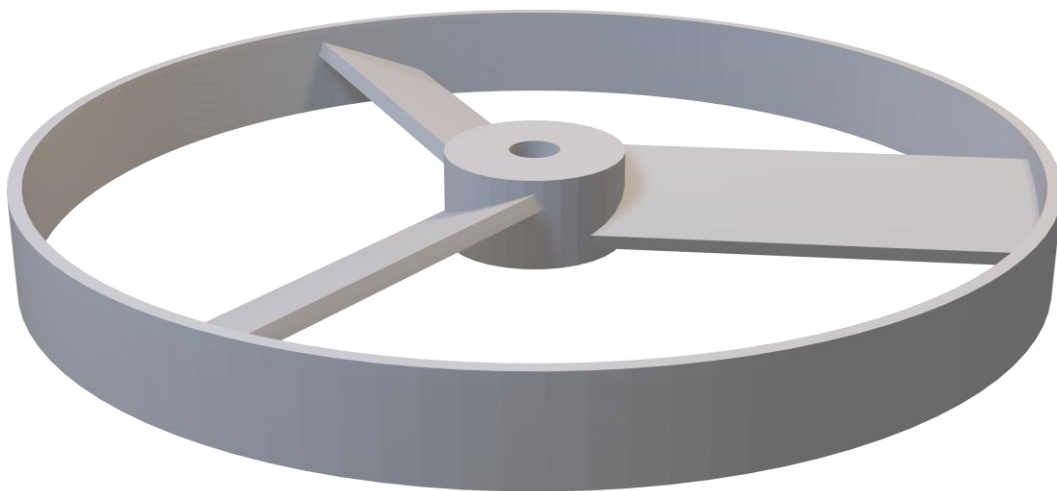
Z prvního výtisku vrtule bylo jasné, že podpory při tisku budou nutností, a to jen z náklonu lopatek, což šlo vyřešit pouze velmi opatrným odstraněním. Po odstranění podpěr bylo patrné, že tisk vrtule probíhal příliš rychle, což způsobilo vady na modelu. Snížením výkonu klimatizace a zpomalením tisku byl tento problém vyřešen. Také nastal problém, že vrtule nedosahovala žádného tahu, ale zostření jedné hrany lopatky tento problém eliminovalo. Bohužel zostření lopatky způsobilo, že ostrá hrana lopatky nedržela pohromadě a oddělovala se na jednotlivá vlákna, ztenčení jednotlivých vrstev filamentu na 0,1 mm bylo řešením problému.

Jako výhodný by se mohl ukázat materiál, který při nízké ceně vydrží větší odstředivou sílu. Takovým materiálem je například PETG. Tisk vrtulí z tohoto materiálu však není realizovatelný, jelikož PETG je citlivý na náhlé změny teplot během tisku, takže se materiál nerovnoměrně smršťuje. PETG má tendenci se špatně přichytávat k podložce, pokud je podložka příliš studená nebo dojde ke kontaktu s chladným vzduchem, materiál nemusí správně přilnout k podložce, což vede k selhání tisku nebo poškození tisknutého objektu. Dalším problémem je náročnost odstranění podpěr, protože podpory z PETG pevněji přilínají k samotnému výtisku. Při pokusu o odstranění podpor může dojít k poškození výtisku, nebo na něm zůstávají zbytky materiálu, které je těžké odstranit.

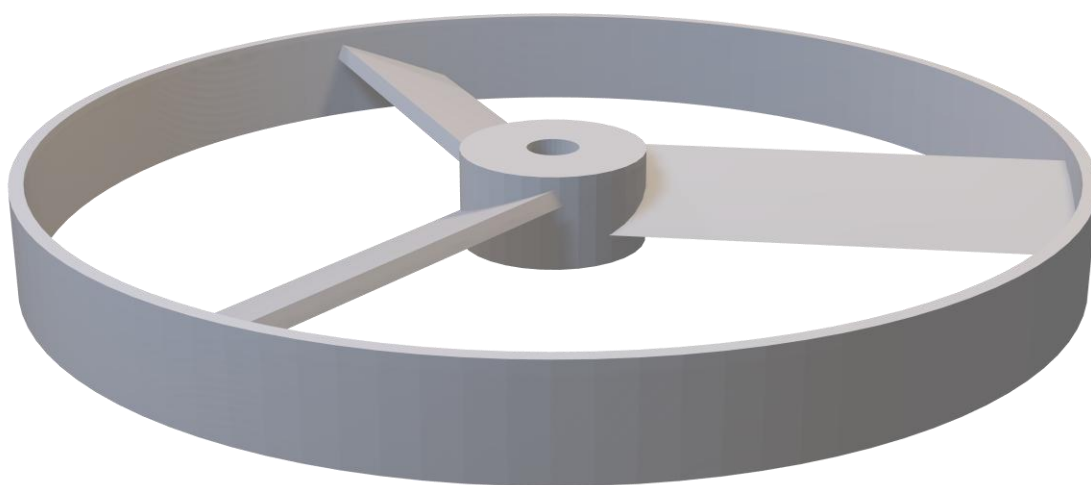


Obrázek 1: Vrtule s vadnou strukturou povrchu lopatek

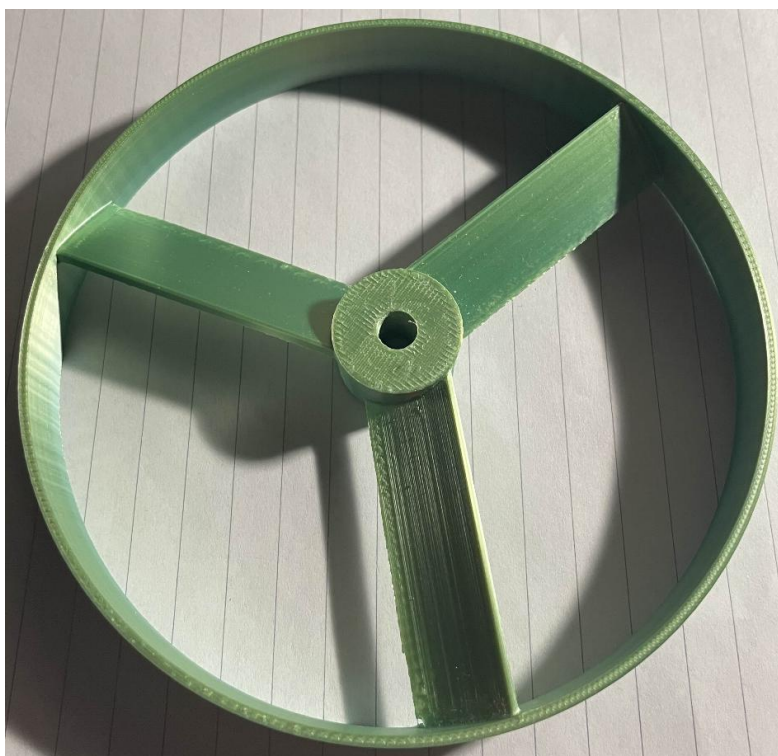
4.2.1 Vrtule se třemi lopatkami



Obrázek 3: původní 3D model vrtule se třemi lopatkami

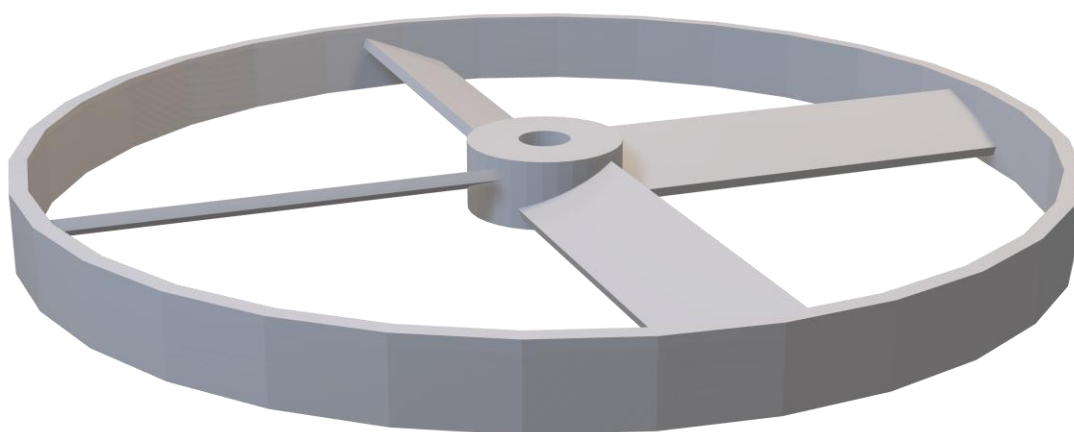


Obrázek 2: upravený 3D model vrtule se třemi lopatkami

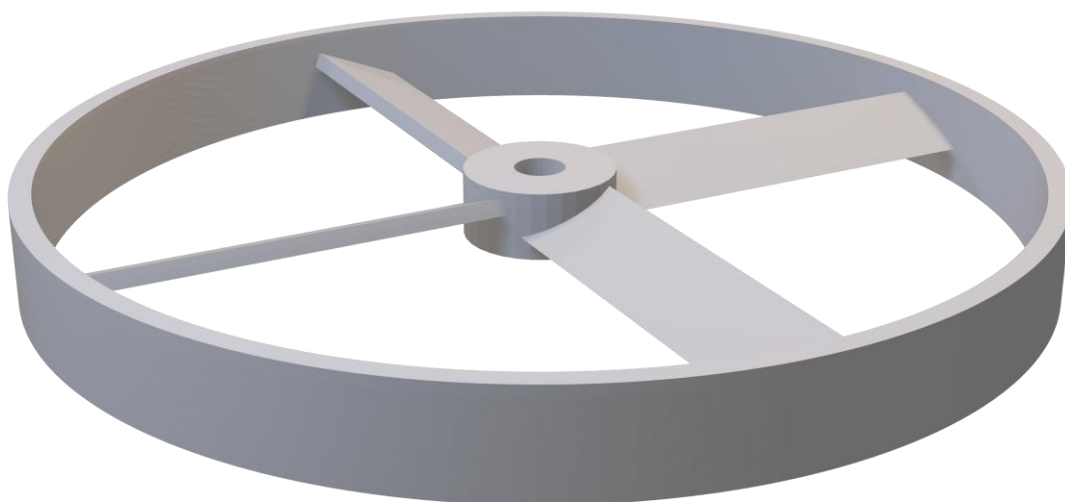


Obrázek 4: Vrtule se třemi lopatkami použitá při měření

4.2.2 Vrtule se čtyřmi lopatkami



Obrázek 5: Původní 3D model vrtule se čtyřmi lopatkami

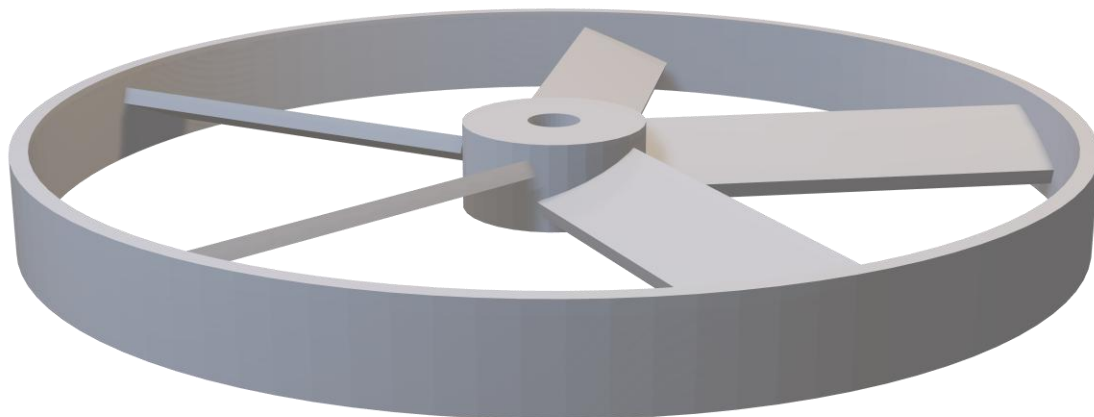


Obrázek 6: upravený 3D model vrtule se čtyřmi lopatkami

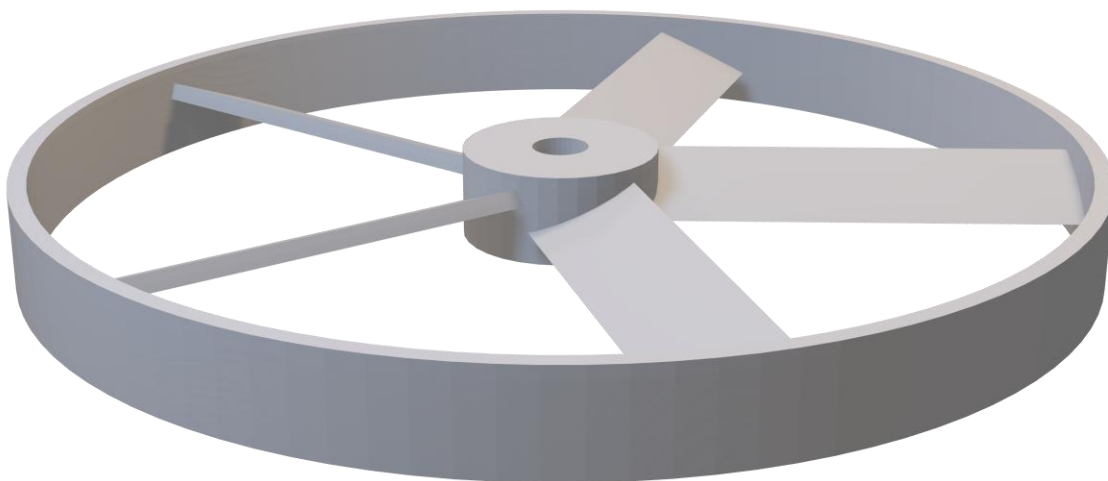


Obrázek 7: Vrtule se čtyřmi lopatkami použitá při měření

4.2.3 Vrtule s pěti lopatkami



Obrázek 8: původní 3D model vrtule s pěti lopatkami



Obrázek 9: upravený 3D model vrtule s pěti lopatkami



Obrázek 10: Vrtule s pěti lopatkami použitá při měření

4.3 Příprava měření

Cílem měření bylo zjistit, zda jednotlivé vrtule dokážou vyvinout nějaký tah, v případě že ano, zjistit jakých hodnot tento tah dosáhne. Tah se běžně kvantifikuje silou, čili budeme měřit sílu, kterou bude vrtule v pohybu vytvářet. Existuje množství metod, jakými měřit sílu, v našem případě byla zvolena metoda pomocí siloměru. Vzhledem ke složitosti měření tahu vrtule přímou metodou, byla zvolena metoda odečtu měřeného tahu diferenciálně, tj. rozdílem dvou definovaných hodnot. Jedna naměřená hodnota bude zatížení siloměru nějakou aparaturou a druhá hodnota bude zatížení siloměru aparaturou při otáčející se vrtuli. Rozdíl obou hodnot na siloměru se tak bude rovnat tahu vrtule.

Aparatura pro měření se skládá ze siloměru, na kterém byl pomocí PVC elektrikářské pásky zavěšen 9,7 V motůrek pro RC modely autíček, který byl napájen kabely ze síťového stejnosměrného zdroje, které vedle ze shora, aby méně ovlivňovaly měření. Kabely od zdroje a od motůrku byly slepeny PVC páskou kvůli eliminaci možnosti rozpojení kabelů. Na ozubeném kolečku na hřídeli motůrku byla nasazená vrtule. Celý řetěz komponent byl ve vertikální poloze. Tato aparatura byla použita při měření tahu u všech tří variant vrtule.

Ačkoliv vrtule byly vymodelovány na míry motůrku, na dvou vrtulích se musela zabrušovat středová část, jelikož se ozubené kolečko motoru do vrtule nevešlo.

4.4 Průběh měření

Po spuštění napájení motůrku docházelo k vibraci motůrku i siloměru z důvodu nepřesnosti 3D tisku, nasměrování a upevnění vrtule. Přidržování siloměru při měření vibrace značně redukovalo. Původně se mělo měřit při nominálním napětí motůrku, tedy 9,7 V, ale ve vyšších otáčkách gyroskopický efekt způsoboval oddělení vrtule od zbytku aparatury, proto se měřilo při nižším napětí 3 V.

Měření mělo probíhat při stejném výkonu a ideálně i rychlosti otáčení, toho však obecně lze dosáhnout jen obtížně, proto byl výkon alespoň monitorován pomocí proudu procházejícího motůrkem. Směr tahu vrtule byl zvolen směrem nahoru, což snižuje efektivitu, ale minimalizuje se riziko sklouznutí vrtule z hřídele při jejím provozu.

4.5 Výsledky měření

-----	U / V	I / mA	F ₁ / N	F ₂ / N	ΔF / N
3 lopatky	3	400	0,49	0,40	0,09
4 lopatky	3	470	0,52	0,42	0,10
5 lopatek	3	456	0,50	0,44	0,06

Tabulka 1: Naměřené hodnoty z testu vrtulí

Z výsledků je patrné, že všechny vrtule dokázaly vyvinout nějaký tah, přičemž nejvyšší tah vyvinula vrtule se čtyřmi lopatkami. Generovala tah 0,1 N při proudu 470 mA, vzhledem k hmotnosti aparatury, která odpovídala zhruba 400 g, by vrtule nedokázala uzvednout ani čtvrtinu hmotnosti motůrku. Vrtule se třemi lopatkami dosáhla tahu 0,09 N při proudu 400 mA, ani tato vrtule by nedokázala motůrek zvednout. Tah vrtule s pěti lopatkami se zdál být dokonce menší než u předchozích vrtulí, dosáhla tahu 0,06 N při proudu 456 mA.

Měření ukazuje, že vrtule se třemi lopatkami generovala velmi podobný tah jako vrtule se čtyřmi lopatkami. Vrtule s pěti lopatkami generovala relativně mnohem menší tah. Zde mohlo sehrát roli množství faktorů, například špatný poměr plochy lopatek ve vztahu k jejich tvaru, popřípadě by mohly roli hrát ještě vibrace při měření, způsobující ztrátu energie. Celkově větší váha z důvodu většího počtu lopatek by také mohla ovlivnit výsledky. Materiál ani tvar vrtulí nevysvětluje pozorovaný rozdíl tahu, jelikož tyto parametry jsou u všech variant shodné.

Jeden z aspektů ovlivňujících výsledky měření je nepřesné vyvážení. Toto vyvážení pravděpodobně přispělo k vibračním aparatury. Pokud by aparatura byla přesně vyvážená a nedocházelo by k vibracím a tah by byl větší. Dalším aspektem je rychlost otáčení motoru. Vyšší rychlost otáčení by tah zvýšila, ale té vzhledem ke gyroskopickému efektu nebylo možné docílit.

5 ZÁVĚR

V úvodu práce jsem si jako cíl vytkl naučit se používat modelovací program a vymodelovat vrtule podle vlastního návrhu. Tohoto cíle jsem dosáhl, pomocí programu jsem vytvořil 3D modely vrtulí, které bylo následně možné vytisknout z materiálu PLA. Přestože vrtule dokázaly generovat slabý tah, existuje několik způsobů, kterými by bylo možné jejich výkon a efektivitu zlepšit.

Hlavním faktorem při volení úhlu náběhu byla nutnost model v pořádku vytisknout. Tento úhel má výrazný vliv na úspěšnost tisku se zvoleným materiálem podpěry. Běžné vrtule mají lopatky aerodynamického tvaru, z důvodu zefektivnění průtoku vzduchu. Protože i tvar vrtulí určoval úspěšnost tisku, snad by bylo možné tento faktor eliminovat použitím podpěr z rozpustného materiálu. Nelze také vyloučit, že oba faktory mají vliv na sílu vibrací při relativně vysokých otáčkách. Zvolená metoda měření tolerovala přítomnost vyššího vyosení vrtule, eliminace této vady by mohla výrazně zlepšit její efektivitu a jistě i stabilitu tahu. Snížení vibrací by také jistě mělo pozitivní účinky na životnost vrtule.

IPřestože PLA nepatří mezi ideální materiály pro výrobu vrtulí kvůli omezeným mechanickým vlastnostem, výsledky byly relativně dobré. Tento materiál vykázal dostatečnou stabilitu i přesnost, což umožnilo funkčních prototypů. Oproti tomu ostatní materiály, jako ABS nebo PETG, často narážejí na problémy při tisku, mezi které patří deformace, špatná přilnavost vrstev nebo náročnost na kontrolu prostředí, což limituje jejich použití. PLA se tak stalo přijatelným kompromisem mezi dostupností, snadností zpracování a kvalitou výsledného produktu.

Použití rozpustného materiálu na podpěry by významně uvolnilo omezení na modelování tvaru vrtule. V takovém případě by samozřejmě bylo nutností použít tiskárnu s možností tisku dvěma různými materiály zároveň.

Eliminací vibrací a poškozujícího gyroskopického efektu by bylo možné docílit otáček, za kterých by daná testovaná vrtule byla nejefektivnější. V takovém případě má samozřejmě smysl odhadovat výkon hnacího motoru metodou, která byla prezentována.

Vrtule s okružím se u kvadrokoptéru využívají především k zajištění vyšší bezpečnosti, zejména u modelů, které jsou určeny pro vnitřní používání, nebo létání v blízkosti lidí. Okružní slouží ke snížení rizika poškození vrtulí nebo či zranění a zároveň by mělo zvýšit aerodynamickou účinnost tím, že omezuje ztráty tahu na koních lopatek. Nevýhodou je zvýšení hmotnosti, což však lze vyřešit použitím lehčího materiálu.

V neposlední řadě by se měla kvůli nižší odolnosti použitého materiálu (PLA) testovat odolnost vrtule při dlouhodobé zátěži.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HOŘENÍ, Bohumír a LNĚNIČKA, Jaroslav. Letecké modelářství a aerodynamika. Knihnice Svazarmu. Řada modelářů. Praha: Naše vojsko, 1977.
- [2] *Co je to řídicí jednotka?* Online. In: DronPro.cz. 2023. Dostupné z: <https://dronpro.cz/co-je-to-ridici-jednotka>. [cit. 2024-12-11].
- [3] *Co je to kvadrokoptéra.* Online. In: DronPro.cz. 2023. Dostupné z: <https://dronpro.cz/co-je-to-kvadrokoptera>. [cit. 2024-12-11].
- [4] Online. In: Krossblade.com. 2022. Dostupné z: <https://www.krossblade.com/history-of-quadcopters-and-multirotors>. [cit. 2024-12-11].
- [5] *Quadcopter.* Online. In: Wikimedia.org. 2024. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Quadcopter>. [cit. 2024-12-12].
- [6] *Tah motoru.* Online. In: Wikimedia.org. 2023. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tah_motoru. [cit. 2024-12-12].
- [7] ANDERSON, John a BOWDEN, Mary. *Introduction to Flight*. 2021. McGraw Hill, 2021. ISBN 978-1260226744.
- [8] Online. In: DronPro.cz. 2023. Dostupné z: <https://dronpro.cz/co-je-to-stabilizator>. [cit. 2024-12-12].
- [9] *Top 10 Commercial Uses For Drones.* Online. In: . 2023. Dostupné z: <https://www.inspiredflight.com/news/top-10-commercial-uses-for-drones.php>. [cit. 2024-12-13].
- [10] *Different Types of Drones and Uses.* Online. In: Jouav. 2024. Dostupné z: <https://www.jouav.com/blog/drone-types.html>. [cit. 2024-12-13].
- [11] SAI TEJA, H.; CHAWAN, Gnanendar; NILAY, Sree; ESWARAIAH, D.; JYOTHI, U.S. et al. Design and analysis of drone propeller by using aluminium and nylon materials. Online. *E3S Web of Conferences*. 2023, roč. 391. ISSN 2267-1242. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101032>. [cit. 2024-12-13].
- [12] *Blender.org.* Online. 2024. Dostupné z: <https://www.blender.org>. [cit. 2024-12-13].
- [13] *Propeller, Types of Propellers and Construction of Propellers.* Online. In: Marineinsight.com. 2020. Dostupné z: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/propeller-types-of-propellers-and-construction-of-propellers/>. [cit. 2024-12-13].
- [14] *Vrtule.* Online. In: Wikimedia.org. 2023. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vrtule>. [cit. 2024-12-13].

[15] 3D tisk. Online. In: Wikimedia.org. 2024. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk. [cit. 2024-12-13].

[16] *Návod na registraci dronu a online test pro pilota dronu krok za krokem*. Online. In: DronPro. 2020. Dostupné z: https://dronpro.cz/navod-na-registraci-dronu-a-online-test-pro-pilota-dronu-krok-za-krokem?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Dronpro-SE-Blog-Registrace%20dronu&utm_id=11259696120&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAx9q6BhCDARIsACwUxu7gg0ZGRpgkkn_r2mdcyGVOeEM8BQtwxWr1zApVNrJvdAHq_nD5VZkaAu_mUEALw_wcB. [cit. 2024-12-13].

7 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1: Vrtule s vadnou strukturou povrchu lopatek	13
Obrázek 2: upravený 3D model vrtule se třemi lopatkami	14
Obrázek 3: původní 3D model vrtule se třemi lopatkami	14
Obrázek 4: Vrtule se třemi lopatkami použitá při měření	15
Obrázek 5: Původní 3D model vrtule se čtyřmi lopatkami	15
Obrázek 6: upravený 3D model vrtule se čtyřmi lopatkami	16
Obrázek 7: Vrtule se čtyřmi lopatkami použitá při měření	16
Obrázek 8: původní 3D model vrtule s pěti lopatkami	17
Obrázek 9: upravený 3D model vrtule s pěti lopatkami	17
Obrázek 10: Vrtule s pěti lopatkami použitá při měření	18
 Tabulka 1: Naměřené hodnoty z testu vrtulí	 19