



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁVRH STABILIZAČNÍHO MECHANISMU PRO FPV KAMERY S VYUŽITÍM CAD/CAM SYSTÉMŮ

DESIGN OF STABILIZATION MECHANISM FOR FPV CAMERA USING CAD/CAM SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. David HOLUŠA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Martin SLANÝ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. David Holuša

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Návrh stabilizačního mechanismu pro FPV kamery s využitím CAD/CAM systémů**

v anglickém jazyce:

### **Design of stabilization mechanism for FPV camera using CAD/CAM systems**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma se zaměřuje na širokou oblast strojírenského zaměření, která v sobě slučuje současně návrh inovačního designu, konstrukční řešení, návrh technologie výroby pro střední a velké výrobní série a odladění výrobního procesu s využitím CAD/CAM technologií, na základě zadaných vstupních parametrů. Práce bude řešit mechanismus redukující výchyly základny oproti upnuté FPV kamery.

Cíle diplomové práce:

Výsledkem práce by mělo být komplexní řešení návrhu mechanické stránky zařízení, s nastíněním navazujících procesů, jako je možnost osazení elektronikou, a programování řídicího cyklu. Výsledné řešení by mělo splňovat vstupní požadavky definované v rámci úvodu diplomové práce.

Seznam odborné literatury:

SHIGLEY, Joseph E. MISCHKE, Charles R. ; BUDYNAS, Richard G. . Konstruování strojních součástí. vyd.1. Brno: VUTIUM , 2010. 1186 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

ŠTULPA, Miroslav. CNC obráběcí stroje. 2. dotisk 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 128 s. ISBN 978-80-7300-207-7.

FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav . Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vydání Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

ČERMÁK, Jaromír. Soudobé otěruvzdorné povlaky a jejich vliv na efektivní využití řezných nástrojů ze slinitých karbidů. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-3901-6

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Slaný, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 21.11.2013

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce obsahuje komplexní návrh stabilizačního mechanismu snímací a FPV kamery pro dálkově ovládaný vrtulový letoun. Shrnuje dosavadní lidské milníky v dané oblasti a popisuje stávající stav poznání a situaci na trhu. S přihlédnutím ke všem získaným vědomostem pak autor popisuje dva různé konstrukční návrhy i s nastíněním navazujících procesů, jako je výroba, osazení elektronikou a uvedení do provozu.

### **Klíčová slova**

CAD/CAM, stabilizační mechanismus, Gimbal, FPV, UAV

## **ABSTRACT**

This diploma thesis provides a comprehensive proposal of stabilization mechanism for sensing and FPV camera for remote controlled propeller plane. Summarizes the current human knowledge milestones in the field and describes the current state of knowledge and the market situation. Taking into account all acquired knowledge the author then describes two different design proposals outlining its related processes, such as manufacturing, electronics installation and commissioning.

### **Key words**

CAD/CAM, Stability mechanism, Gimbal, FPV, UAV

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HOLUŠA, David. *Návrh stabilizačního mechanismu pro FPV kamery s využitím CAD/CAM systémů*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 81 s. 4 přílohy. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný, Ph.D.

### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh stabilizačního mechanismu pro FPV kamery s využitím CAD/CAM systémů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Bc. David Holuša

### **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto svému vedoucímu Diplomové práce, Ing. Martinovi Slanému, Ph.D., za trpělivost, pomoc a cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce, své rodině a kamarádům za podporu při studiu a svým zaměstnavatelům, bývalými i současným, za umožnění studia při zaměstnání.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 HISTORICKÝ ZÁKLAD.....	10
1.1 Historie helikoptér.....	10
1.2 HISTORIE UAV a FPV .....	15
1.3 Od UAV k MAV .....	20
2 TECHNIKA MAV.....	21
2.1 Přehled nejčastěji používaných multikoptér .....	21
2.1.1 Monokoptéra.....	21
2.1.2 Dualkoptéra.....	22
2.1.3 Trikoptéra.....	22
2.1.4 Quadkoptéra.....	22
2.1.5 Hexakoptéra .....	23
2.1.6 Oktokoptéra .....	23
2.1.7 Víceroťorové koptéry .....	23
2.2 Hlavní komponenty koptér a FPV zařízení .....	24
2.2.1 Motory .....	24
2.2.2 Regulátory otáček trojfázových motorů .....	25
2.2.3 Napájení .....	26
2.2.4 Řídicí jednotka.....	26
2.2.5 Senzory .....	27
2.3 Záznamová a přenosová zařízení FPV systémů.....	29
2.3.1 CCD a CMOS kamery .....	29
2.3.2 Přenos signálu .....	29
2.3.3 LCD a brýle .....	30
3 VSTUPNÍ PARAMETRY NÁVRHU.....	31
3.1 Stávající stav na trhu .....	31
3.2 Popis stávajících komponent.....	34
3.2.1 Snímací kamera.....	34
3.2.2 CCD kamera .....	35
3.2.3 Hexakoptéra .....	37

3.3	Původní návrhy .....	38
4	KONSTRUKČNÍ NÁVRH STABILIZAČNÍHO SYSTÉMU.....	44
4.1	Varianta 1 .....	44
4.1.1	Základní komponenty varianty 1 .....	46
4.1.2	Uvažovaný materiál a povrchová úprava.....	49
4.1.3	Analýza FEA.....	49
4.2	Varianta 2 .....	55
4.2.1	Základní komponenty varianty 2 .....	57
4.2.2	Uvažovaný materiál a povrchová úprava.....	61
4.2.3	Analýza FEA.....	62
4.3	Konstrukční nakupované komponenty.....	65
4.3.1	Kluzné pouzdro Iglidur G GFM-0607-045.....	65
4.3.2	Šrouby M3 s půlkulatou hlavou s vnitřním šestihranem .....	65
4.3.3	Motory pohonu .....	66
5	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A DALŠÍ SMĚŘOVÁNÍ PROJEKTU .....	67
5.1	Porovnání základních parametrů obou variant.....	67
5.2	Návrh výroby pro variantu 1 .....	68
5.3	Návrh výroby pro variantu 2 .....	69
5.4	Další směřování projektu .....	70
	ZÁVĚR .....	71
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	72
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	75
	SEZNAM TABULEK .....	77
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	78
	SEZNAM PŘÍLOH.....	79



## ÚVOD

Problematika bezpilotních letounů je relativně nová disciplína a jako taková ještě nedosáhla svého vrcholu, je tedy stále co zjišťovat. Snaha o let s kolmým startem je známa již od dob Leonarda Da Vinciho, ale první praktické pokusy se datují až od 18. století. Po několika letech neúspěšných pokusů se nakonec povedlo techniku letu ovládnout, ať už se jednalo o stroje s kolmým startem nebo o stroje, které pro vzlet a přistání potřebovaly dráhu a dnes jsou již letadla a helikoptéry každodenní součástí našeho života.

Již během objevování fyzikálních zákonitostí letu ale člověk přišel s myšlenou, jak donutit létající stroje setrvat ve vzduchu a plnit tam předem definované úkoly bez toho, aby na palubě musel být přítomen člověk – pilot. Ze začátku byly stroje ovládány ze země, například lany, stejně jako dětští létací draci, s postupem času se ale podařilo stroje čím dál tím více osamostatňovat. Zprvu mohly samostatně létat, ale například do vzduchu musely být dopraveny buď pomocí pilota, nebo jiným, k tomu určeným prostředkem (například katapult), v dnešní době již bezpilotní letouny a multikoptéry různých velikostí dokáží samy vzlétnout, letět na určená místa, plnit přidělené úkoly a nakonec se vrátit zpět na základnu. Pomohl tomu velký pokrok v oblasti techniky i elektroniky, stroje bývají vybaveny GPS navigačními systémy, díky stále úspornějším pohonům mají delší dolet a jejich řídicí systémy dokáží naráz zvládat velké množství operací, tudíž se dokáží samy vyrovnat i s nepříznivými podmínkami, jako je například špatné počasí.

Díky technické vyspělosti bezpilotních strojů se jejich použití v dnešní době čím dál tím víc rozšiřuje. Slouží jako bojové stroje armády, dokáží prozkoumávat těžko dostupný terén, plní nejrůznější mise při sbírání fotografických a video materiálů případně slouží záchranným složkám pro prozkoumávání potenciálně nebezpečných a těžko přístupných míst. Díky širokému profesionálnímu uplatnění, a tedy i logickému snižování pořizovacích cen, díky většímu odbytu, se tyto stroje rychle rozšiřují i do sektoru služeb, kde je s výhodou využívají filmaři či tvůrci fotografií, používají se pro přenosy ze sportovních utkání a záznamy koncertů a v neposlední řadě se začínají stávat i prostředkem pro zábavu.

Vzhledem k tomu, že primární funkcí je většinou pořizování záznamu či prodloužení letu mimo zorné pole pilota, umisťují se na bezpilotní stroje stabilizační zařízení. Tyto mají uživateli umožnit větší rozhled pomocí přenášeného obrazu, zprostředkovat snímání objektů z ptačí perspektivy či těch pohybujících se mimo dráhu letu. Dále pomáhají mimo jiné při snímání okolí infrakamerami (například při hledání pohřešovaných osob) a v neposlední řadě mají kompenzovat nechtěné i chtěné pohyby stroje a stabilizovat snímání obrazu. A právě mechanickým návrhem se tato diplomová práce zabývá.

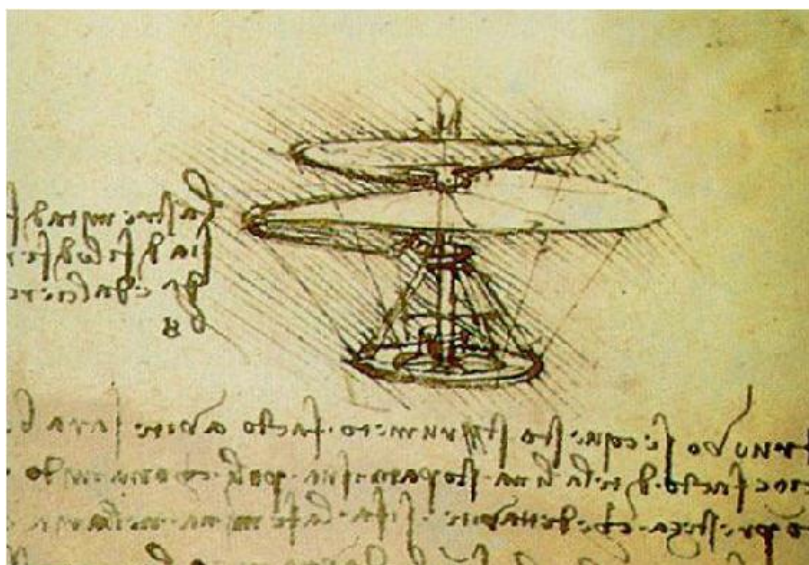
Jedná se o komplexní téma, které zahrnuje pochopení principů, které vedly k dnešnímu stavu poznání, z historických pramenů, návrh mechanické stránky věci, musí brát v úvahu i navazující výrobní procesy, tudíž je potřeba vzít v úvahu i materiály pro výrobu, konkrétní použití mechanismu a principy spolupracujících zařízení.

## 1 HISTORICKÝ ZÁKLAD

První kapitola se bude věnovat širšímu historickému úvodu do problematiky vývoje létání RC<sup>1</sup> ovládaných multikoptér a jejich dnešnímu nejčastějšímu použití.

### 1.1 Historie helikoptér

Za nejstarší historické záznamy o létajících strojích se považují zmínky ze staré Číny, cca 400 let před naším letopočtem, kdy si, dle dostupných informací, děti hrávaly s peřím, přichyceném na tyčince, kterou sevřeli v dlaních, a rychlým pohybem dlaní proti sobě tuto hračku roztočily. Podobné hračky lze nalézt v obchodech ještě dnes. Inspirací byly pravděpodobně rotující padající lístky stromů. O mnoho let později se myšlenkou létání začal zabývat vědec a myslitel Leonardo da Vinci (1452 – 1519), který zkoumal zákonitosti létání, zkoumal mechaniku létání a připravoval jak praktické, tak teoretické podklady k sestrojení létacího zařízení. Jeden z jeho nejznámějších návrhů je uveden na Obr. 1. Jeho pokusy o let však nebyly úspěšné (nebo to alespoň není známo) a zůstaly zapomenuty až do 19. století [1].

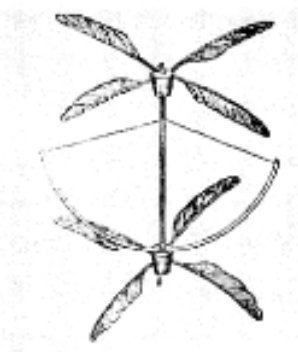


Obr. 1: Nákres da Vinciho létacího stroje [7].

Roku 1754 demonstroval Michail Lomonosov na Ruské Akademii Věd tandemový motor poháněný pružinou (viz Obr. 2), jehož princip byl navržen jako jeden z možných prostředků pro vyzvednutí meteorologických přístrojů do atmosféry [1].

---

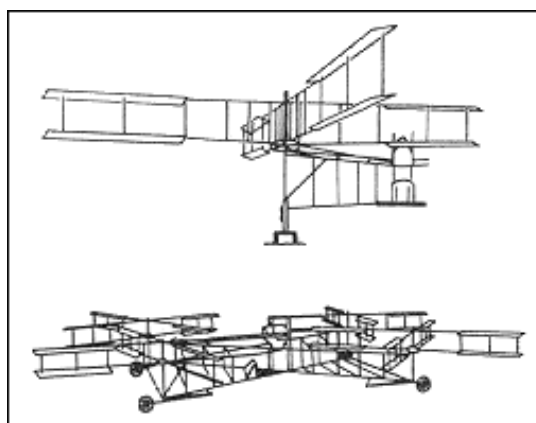
<sup>1</sup> RC – dálkově ovládaná rádiem, z anglické zkratky Radio nebo Remote Controlled



Obr. 2: Lomonosovův tandemový motor [4].

Slovo helikoptéra, které poprvé v roce 1861 použil Gustave de Ponton D'Amécourt, jemuž se mimo jiné připisuje prvenství v použití hliníku, se stalo synonymem pro popis vrtulových strojů umožňujících vertikální let [2].

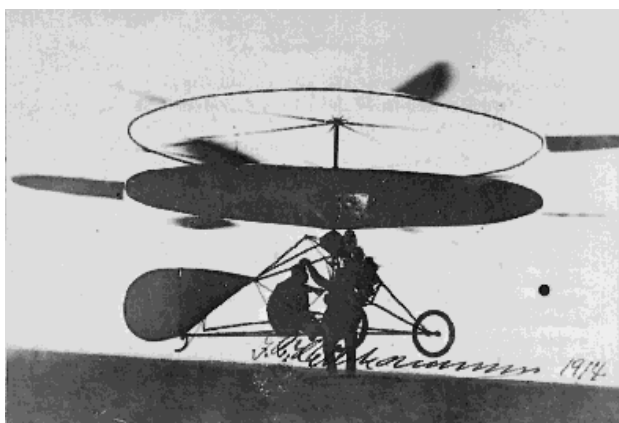
Po mnoha více či méně úspěšných pokusech o sestavení stroje, předcházejícího dnešní helikoptéry (za zmínku stojí údajné prvenství slovenského konstruktéra Jána Bahýľa, z roku 1901, kdy jeho stroj dosáhl výšky 4m nad zemí a přeletěl více jak 1500m, ale jež není z důvodů administrativních pochybení obecně uznáváno), se podařilo roku 1907 dvěma francouzským bratřím, Jacquesi a Louisi Brequetům, sestavit „Gyrolán No. 1“, který se v září toho roku na dobu jedné minuty vznesl asi půl metru nad zem (viz Obr. 3) [3].



Obr. 3: Gyrolán No. 1 bratří Brequetů [2].

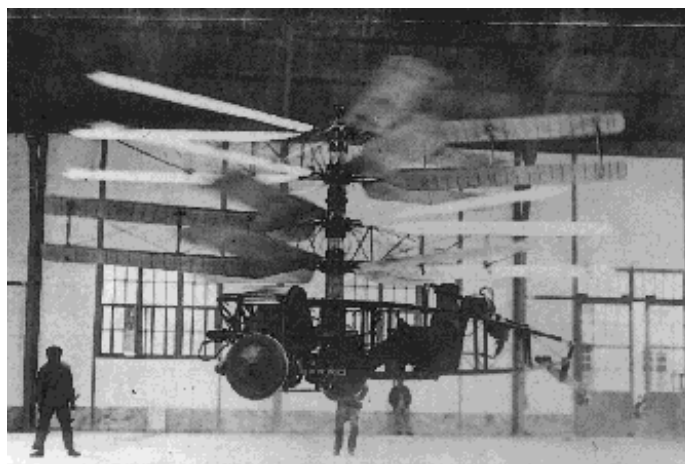
Vzhledem k nutnosti asistence stroji při balancování však nebyl pokus bratří Brequetů považován za první řízený let, ale pouze za první let s lidskou posádkou [3].

O první řízené lety se postaral dánský vynálezce Jacob Ellhammer, který v roce 1914 sestrojil helikoptéru, nesoucí jeho jméno – „ELLHAMMER“ (Obr. 4). Stroji s šesti lopatkami po obvodu dvou protiběžných kol se povedlo absolvovat několik úspěšných volných vzletů, ovšem v září roku 1916 se helikoptéra převrátila a zničila svoje rotory. [4]



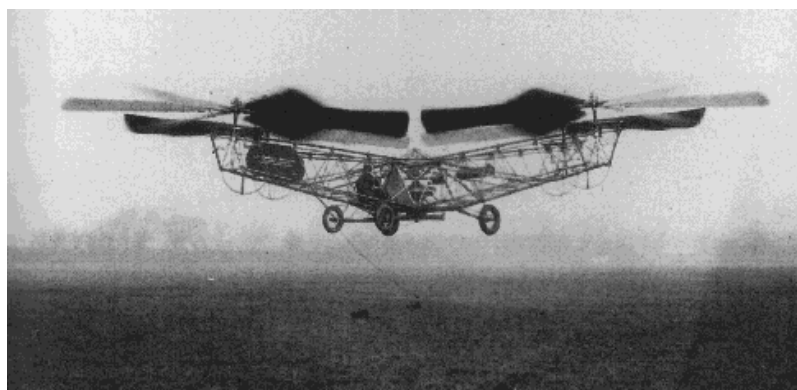
Obr. 4: Helikoptéra "Ellhammer"[8].

Dalším výrazným milníkem byl v začátcích dvacátých let 19. století vynález konstruktéra Raoula Pateras-Pescary, který je asi nejznámější díky svému přínosu v podobě dosažení efektivní letové kontroly. Pescara byl jedním z prvních, kdo zaznamenal a potvrdil fenomén autorotace a definoval systém, jak by měl pilot kontrolovat svůj stroj. Jako jeden z prvních tedy popsal, definoval a aplikoval ovládání tří základních pohybů helikoptér: pitch – yaw – roll, neboli česky zdvih – otočení – naklonění. Jeho helikoptéra (zobrazena na Obr. 5) mohla tedy krom pohybu nahoru a dolů vykonávat současně také pohyb vpřed či vzad, což byl na tu dobu nevídaný pokrok [4].



Obr. 5: Pateras-Pescarův stroj schopný samostatného letu [3].

Dvacátá léta 19. století ovšem přinesla do leteckého průmyslu více objevů a poznatků, jedním z nich je přímý předchůdce dnešních multikoptér na dálkové ovládání. Roku 1922 ruský emigrant žijící v USA jménem Georges de Bothezat postavil, díky kontraktu s armádou USA, jednu z největších vícerotorových helikoptér tehdejší doby, čtyř vrtulový stroj s šesti lopatkami na každém z nich a s dalšími 4mi pomocnými menšími rotory, přezdívaný „Flying Octopus“ aneb Létající Chobotnice (viz Obr. 6). Tento jeho stroj absolvoval mnoho úspěšných letů, byť v malé výšce a v nízkých rychlostech [9].



Obr. 6 "Flying Octopus" [9].

Podobný návrh vícerotorového stroje v tomto období realizoval i Ettiene Hemichen, jehož stroj byl sice komplexním sloučením vše do té doby nabytý poznatků, ovšem díky své složitosti a tedy i vysoké váze byly jeho pohony značně poddimenzované a stroj musel být zavěšen za heliový balón, což jej činilo nepoužitelným pro praktické použití [4].

Nakonec, o něco později, ve třicátých letech 19. století, přišli s podobnými nápady ještě pánové Corradino d'Ascanio, jehož stroj byl osazen dvěma dvoulopatkovými, proti sobě se otáčejícími, rotory, Maitland Leecker se sice jednorotorovým strojem, ale na každé lopatce byl umístěn ještě jeden stabilizační rotor a nakonec inženýr Nicolas Florine, který sestrojil první úspěšný dvourotorový stroj, jehož rotory se sice točily ve stejném smyslu otáčení, ale byly nakloněny proti sobě, tedy vzájemně kompenzovaly momentové reakce [4].

Od této doby již postupoval vývoj helikoptér mílovými kroky kupředu a díky svým letovým schopnostem se tyto stroje staly stěžejními prvky v některých lidských oblastech. Jejich vysokou pořizovací cenu kompenzuje jejich schopnost manévrovat, takzvaně „viset“ na jednom místě ve vzduchu, kolmo přistávat a vzlétat a mnoho dalších. To jim zajistilo pevné místo v armádách, u záchranářů, zpravodajců, ale i v soukromém sektoru, ať již slouží k zábavě, nebo jako rychlý a agilní dopravní prostředek pro převážně bohatší klientelu.

Některé příklady nejznámějších strojů od světových výrobců jsou uvedeny níže, viz Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9.



Obr. 7: Hughes AH-64 Apache [10].



Obr. 8: Sikorsky SH -3 Sea King [11].

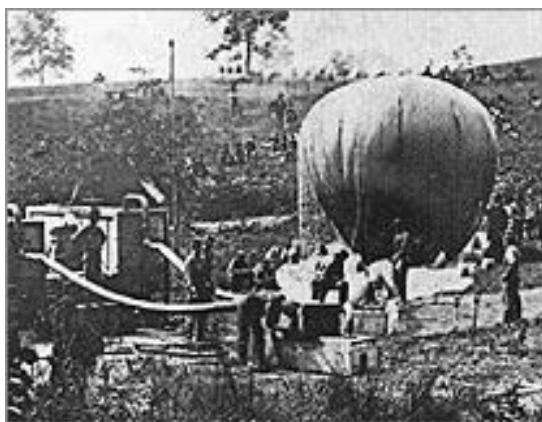


Obr. 9: Boeing CH-47 Chinook [12].

## 1.2 HISTORIE UAV<sup>2</sup> a FPV

Úspěšné zvládnutí techniky letu vedlo člověka k zamyšlení, jak dále využít potenciál létajících strojů (ať už letadel nebo helikoptér). Dlužno říci, že hlavním hnacím motorem v těchto oblastech byly vždy potřeby armád po celém světě a jejich snahy co nejmenších ztrát na životech vlastních členů. Vznikl tedy princip UAV, tedy takzvaných bezpilotních letounů, které jsou ovládány na dálku, případně které jsou plně autonomní a je vyžadována pouze jejich kontrola.

Dá se říci, že historie bezpilotních strojů je stejně stará, jako sama snaha o let. Již během americké občanské války (1861-1865) se Unie snažila pomocí neřízených horkovzdušných balonů naložených hořlavinami zapříčinit požáry za bojovou linií Konfederace. Tyto balóny (na Obr. 10) vynalezl, a nechal si je v únoru roku 1863 patentovat, newyorský vynálezce Charles Perley. Před vypuštěním balonů se prvně vysílaly jakési průzkumné sondy, podle kterých se měřila přibližná doba a směr letu a následně se podle nich nastavovaly časovače na samotných balonech nesoucích hořlavý náklad, nicméně jejich úspěšnost nebyla nijak valná a kvůli povětrnostním změnám často explodovaly nad územím unie zapříčiňující škody ve vlastních řadách [14].



Obr. 10: Pearlyho horkovzdušný balón s výbušninami [6].

Dalším průkopníkem, který ovšem s válkou ani armádou neměl žádné spojení, nicméně se nechtěně stal vzorem pro pozdější hojně používání UAV strojů během válečných i mírových konfliktů a misí byl Angličan Douglas Archibald. Tento muž sestrojil jakýsi kite<sup>3</sup>, na nějž připevnil fotoaparát a pořídil tak první fotky ze vzduchu. Po jejich publikaci se tohoto

<sup>2</sup> UAV – z anglického Unmanned Aerial Vehicle – volný překlad je bezpilotní letoun

<sup>3</sup> Kite – samostatně letící křídlo, nebo soustava více křidel, která je ze země na dálku ovládána systémem lan, jeho let je tedy omezen délkou tohoto lana, v dnešní době se kite používá hlavně při sportu zvaném kiteboarding, kdy je člověk pevnými popruhy k tomuto křídlu připoután a kite funguje pohon pro pohyb po vodní hladině nebo na lyžích



nápadu rychle chytly armády po celém světě. Záhy poté bylo množstvím takovýchto strojů (viz Obr. 11) použito během španělsko-americké války v roce 1898, kdy coloradský plukovník William Eddy nařídil jejich použití a během těchto průzkumných letů byly pořízeny stovky fotografií nepřátelských pozic, jejich opevnění a vybavení a poskytly tak Američanům obrovskou taktickou výhodu [14].



Obr. 11: Eddyho průzkumné kity [6].

Během první Světové války se v USA uskutečnilo mnoho letů a výzkum v oblasti UAV se značně posunul. Ještě před válkou, v roce 1917 Dr. Peter Cooper a Elmer A. Sperry vynalezli první automatický gyroskopický stabilizátor, který pomáhal letadlům udržovat letovou výšku a směr. Tento technologický průlom poté jeho vynálezci přetvořili, za využití tréninkového letadla americké armády Curtiss N-9, v první radiově ovládaný bezpilotní letoun. Sperry Aerial Torpedo, jak byl letoun pojmenován (vyobrazen na Obr. 12), několikrát během testovacích letů dopravil na vzdálenost asi 50 mil<sup>4</sup> 300 librovou<sup>5</sup> bombu, ale nikdy se do přímého boje nedostal [15].



Obr. 12: Sperry Aerial Torpedo [15].

<sup>4</sup> 1 míle je 1852 metrů

<sup>5</sup> 1 libra je 0,454 kilogramu



Dalším vynálezem, který je dlužno zmínit, je svým nápadem obdobný tomu předešlému od pánů Coopera a Sperryho. Charles F. Kettering z General Motors navrhl konstrukci ze dřeva a plátna, jejíž výrobní náklady byly přibližně 400 dolarů a která unesla bombu o maximální stejné, jako byla hmotnost samotné konstrukce a to opět 300 liber. Toto malé dvoukřídle letadlo, které dostalo přezdívku „Kettering Bug“ (Ketteringova štěnice, viz Obr. 13), bylo navrženo tak, aby mohlo vzlétnout z vozíku s kolečky a následně, po dosažení cílové destinace, automaticky odpojilo svá křídla, což umožnilo bombě klesat vertikálně rovnou na přednastavený cíl. Americká armáda si těchto strojů objednala velké množství, nicméně vzhledem k tomu, že válka záhy po objednávce skončila, armáda všechny objednávky stáhla [13].



Obr. 13: Kettering Bug [6].

Po skončení obou válek zájem o UAV prudce upadl, nicméně ve třicátých letech se ve službách Britského královského letectva objevil letoun DH.82B Queen Bee (viz Obr. 14), první bezpilotní letoun schopný návratu a opakovaného použití. Letouny byly používány jako cvičné cíle královského letectva a námořnictva. Od roku 1935 do roku 1947, kdy byly letouny vyřazeny, jich bylo celkově nasazeno 380, byly schopny vystoupat do výšky 17000 stop<sup>6</sup> a uletět maximálně 300 mil rychlostí přes 100 mil za hodinu [17].



Obr. 14: DH.82B Queen Bee [16].

<sup>6</sup> Jedna stopa je 0,305 metru

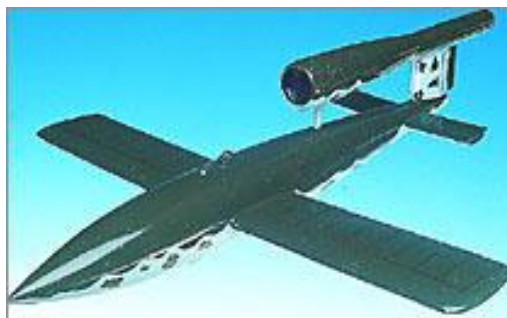
Obdobnými tréninkovými stroji byla vybavena i americká armáda, která od roku 1939, kdy bývalý britský pilot a letecký nadšenec Reginald Denny společně se skupinou odborníků ze společnosti Lockheed Company založili v Los Angeles firmu Radioplane Company (dnes Northrop/Grumman) a zkonstruovali velké dálkově ovládané letadlo (jedno z nich je na Obr. 15). Toto letadlo, a jeho pozdější vývojoví následovníci, se přezdívali OQ Targets a americká armáda na nich vytrénovala více než jednu generaci protiletectvých střelců. Letadlo vzletlo vystřelením pomocí jakési velké gumy a přistávalo za použití velkého padáku [18].



Obr. 15: Letadlo společnosti Radioplane Company [18].

Dalšího využití se dočkaly bezpilotní letouny během druhé světové války, na jedné straně byl německý Vergeltungswaffe-1, neboli V-1, což byl bezpilotní letoun startující z rampy pomocí mechanismu, připomínajícího katapult, a na straně druhé byly americké letouny PB4Y-1 Liberators a BQ-7, což byly původně bombardéry, které byly nově vybaveny televizním navigačním systémem a byly sestrojeny za účelem likvidace německých V-1 [6].

Německé letouny V-1 (viz Obr. 16) byly poháněny tryskovým motorem umožňujícím letounu vyvinout rychlost více než 470 mil za hodinu. Letoun mohl nést až 2000 liber těžkou válečnou hlavici a byl naprogramován tak, aby uletěl 150 mil před shobením těchto bomb. Tyto stroje byly stvořeny s posláním použití na nevojenské cíle a bohužel byly hned při svém prvním pokusu v roce 1944 v Británii úspěšné, protože zabily více než 900 civilistů a dalších více než 35000 jich bylo při náletu zraněno [6].



Obr. 16: Přibližná podoba německého stroje V-1 [6].

Naproti tomu americké bombardéry PB4Y-1 Liberators (viz Obr. 17) a BQ-7 vzlétaly s dvoučlennou posádkou, která musela letoun dovést až do výšky 2000 stop a následně jej padákem opustit. Letouny mohly nést až 25000 liber zbroje a byly ve svém ničení základen V-1 úspěšné. Jsou také považovány za první UAV, která byla použita proti UAV [19].



Obr. 17: Bombardér PB4Y-1 Liberator [19].

Posledním velkým milníkem v použití UAV bylo jejich použití pro výzvědné akce v režimu neviditelnosti. Tvar letounů a jejich povrch byly přizpůsobeny tak, aby je nešlo zachytit na radaru (nebo alespoň velmi obtížně) a tyto bezpilotní letouny se od války ve Vietnamu zúčastnily velkého množství válečných i mírových misí [6].

V dnešní podobě největší množství dálkově ovládaných bezpilotních letounů používá americká armáda a jsou známy pod názvem RQ-1 Predator (viz Obr. 18). Kromě snímání terénu mohou být použity jako nosiče raket, jako zásobovací letadla pro opuštěné oblasti, ale slouží i narmádním účelům, pro průzkumnou vědeckou činnost, mapování pohybu zvířat, ke sledování pašeráků, k vyhledávání pohřešovaných osob v těžko přístupných oblastech za nepříznivého počasí a díky své agilitě, dlouhému doletu a schopnosti přistávat a vzlétat na všech možných typech povrchů jsou v plnění svých úkolů velice úspěšné [20].



Obr. 18: UAV letoun RQ-1 Predator [21].

### 1.3 Od UAV k MAV

Vývoj v oblasti RC UAV, které musí startovat a přistávat jako letadla, tedy potřebují vzletovou a přistávací dráhu, se ocitl skoro na svém vrcholu, ale myšlenka dalšího využití dálkově ovládaných modelů rozhodně nezůstala opomenuta. Díky neustálému vývoji v oblasti materiálů, výrobních procesů a technologií a stále dokonalejším ovládacím mechanismům dali výzkumníci vzniknout nové větvi RC ovládaných bezpilotních letounů, ovšem podstatně menším, mnohem hbitějším a mnohem lépe manévrovatelnějším, takzvaným MAV (Micro Aerial Vehicle). Tyto MAV jsou malé bezpilotní letouny, většinou v podobě elektřinou poháněných vícevtulových multikoptér, které nachází široké uplatnění jak ve vládním, tak v soukromém sektoru.

V dnešní době jsou MAV používány k různým účelům. Nejčastěji k pozorování, kdy jsou na dálku ovládané stroje vybaveny snímacími kamerami (případně kamerami s nočním či infračerveným viděním). Pomáhají armádě při průzkumu terénu, záchranářům v případě hledání pohřešovaných či zraněných osob v těžko přístupných místech, k průzkumu jeskyní, míst, která jsou nestabilní a hrozí zranění osob (například doly), fotografům a kameramanům slouží k pořizování nekonvenčních materiálů a v poslední době se staly také volnočasovou zábavou pro nadšence. Létání s těmito stroji ale není neregulované a každý uživatel v ČR musí splňovat požadavky směrnice CAA/S-SLS-010-n/2012, kterou vydal Úřad pro civilní letectví.

## 2 TECHNIKA MAV

Tato práce se zabývá návrhem stabilizačního mechanismu, který má sloužit pro přenos a záznam obrazu, je tedy nutné si přiblížit stroje, na kterých jsou tyto stabilizační mechanismy připevněny a systémy jejich ovládání, které mají přímou návaznost na konstrukční řešení stabilizačního systému.

### 2.1 Přehled nejčastěji používaných multikoptér<sup>7</sup>

Níže budou krátce popsány nejběžněji používané koncepce strojů, ke kterým jsou stabilizační mechanismy a FPV zařízení připevněny.

#### 2.1.1 Monokoptéra

Hned první typ je jakási výjimka, říká se mu také gyrokoptéra, je to jedno vrtulový stroj využívající principu padajícího listu. Jako první byl vyvinut stroj s názvem Black Widow (Černá vdova, viz Obr. 19), zařízení vážící pouhých několik desítek gramů, v diagonále měřící pouhých cca 13cm a schopný letět více než půl hodiny, vystoupat do výšky 800 stop a doletět na vzdálenost 1,8km. Letoun je navíc vybaven barevnou videokamerou a dalšími záznamovými zařízeními. Byl vyvinut pro agenturu DARPA<sup>8</sup> a oceněn mnoha cenami [24].



Obr. 19: Monokoptéra Black Widow [6].

<sup>7</sup> Multikoptérou označujeme letoun s více vrtulemi, schopný startovat a přistávat vertikálně

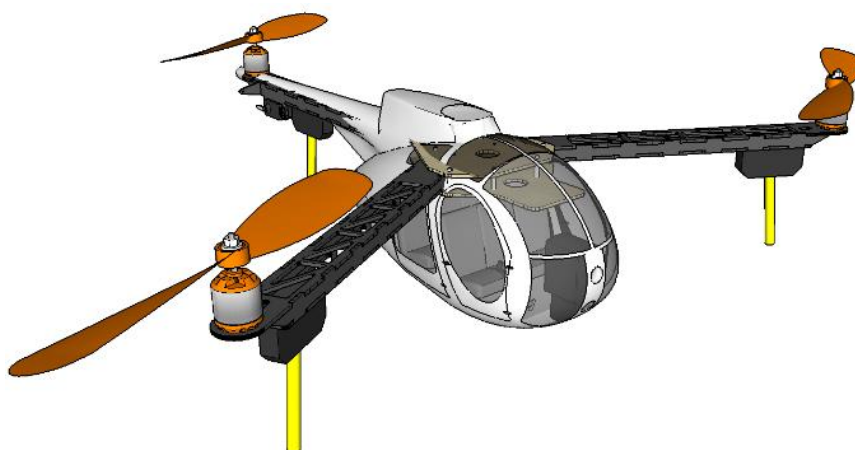
<sup>8</sup> DARPA – Defensiv Advanced Research Project Agency

### 2.1.2 Dualkoptéra

O něco méně vzácný, stále však velmi netypický zástupce MAV je dualkoptéra, která má nad sebou umístěny dva protichůdné rotory v turbíně, díky nimž řídí výšku letu, a jejich vzájemným zrychlováním a zpomalováním i otáčení. Navíc jsou stroje vybaveny ještě klapkami, které ovládají náklon [25].

### 2.1.3 Trikoptéra

Tato konstrukce je relativně nenákladná (díky faktu, že obsahuje pouze 3 rotory), vyznačuje se velkou agilitou, ale má mnohé problémy. Jsou jimi nízká stabilita v nepříznivých podmínkách, potenciálně slabé místo v natáčecím stabilizačním rotoru, malý zdvih z důvodu malého počtu rotorů a navíc vysokou spotřebu elektrické energie (tedy krátkým doletem), protože rotory se musejí točit neefektivně rychle a v případě výpadku jednoho rotoru se neudrží ve vzduchu. Vybraný příkladový model je zobrazen níže na Obr. 20. [25]



Obr. 20: Trikoptéra [25].

### 2.1.4 Quadkoptéra

Konstrukce quadkoptér je jednodušší, než v případě trikoptér, protože neobsahují stabilizační servomotor, mají až o třetinu vyšší zdvih a jsou jen o něco málo těžší. Jsou stabilnější (ovšem na úkor manévrovatelnosti) a stejně jako Trikoptéra nejsou schopny po výpadku jednoho z motorů kontrolovaně přistát [25].

Zvláštním typem quadkoptéry je takzvaný V-Tail nebo Y4, což je quadkoptéra s rotory rozloženými ve tvaru písmene Y, přičemž na zádi jsou dva protichůdné motory [25].

Zástupce čtyřrotorových strojů je vyobrazen na Obr. 21.





Obr. 21: Quadkoptéra Helix X4 [26].

### 2.1.5 Hexakoptéra

Jak již název napovídá, jedná se o koptéru s šesti rotory umístěnými pravidelně po obvodě. Její hlavní výhodou je schopnost bezpečného přistání i v případě výpadku jednoho rotoru, její již relativně vysoký zdvih, který jen mírně navyšuje spotřebu elektrické energie (v porovnání s quadkoptérou). Její nevýhodou je velikost a výrobní náročnost, lze ji ovšem již s výhodou využívat pro přenos více záznamových zařízení (například záznamovou kameru a kameru přenášející živý obraz pro pilota), což ji předurčuje k delším letům i mimo zorné pole pilota. Tento stroj bude také využit pro montáž prototypu FPV zařízení, které je cílem této bakalářské práce, protože k němu mám přístup [25].

### 2.1.6 Oktokoptéra

Koptéra s osmi rotory, navzdory vyšší výrobní ceně a spotřebě energie, má jednu hlavní výhodu a tou je zachování plné letové schopnosti i v případě výpadku jednoho rotoru a je tedy vhodná k přenosu drahého vybavení, jakými jsou zrcadlové fotoaparáty a výkonné kamery přenášející obraz ve vysokém rozlišení [25].

### 2.1.7 Víceroťorové koptéry

Je samozřejmě možné potkat i koptéry s více než osmi rotory, jejich konstrukce je ale velmi složitá a řízení rotorů se zpravidla skládá z více prvků, které simulují současnou činnost dvou méně rotorových strojů. Tedy například pro decakoptéru (10 rotorů) má řídicí jednotka nastaveny hodnoty pro hexa a quadkoptéru, přičemž každá skupina plní jiné funkce (zdvih, natočení, naklopení, rotaci) [25].

## 2.2 Hlavní komponenty koptér a FPV zařízení

V této části budou uvedeny nejdůležitější komponenty konstrukce MAV s krátkým popisem. Tato znalost je důležitá pro budoucí implementaci řízení stabilizačního mechanismu do rozhraní stroje.

### 2.2.1 Motory

Motory, které pohánějí samotné koptéry a stabilizační mechanismy, se dělí na brushless, což jsou motory střídavé a brushed, což jsou motory stejnosměrné.

Stejnosměrné motory jsou tvořeny klasickou koncepcí. Rotor je osazen elektromagnety s několika póly a stator je tvořený permanentním magnetem. Do cívek rotoru je elektrický proud přiváděn přes komutátor, což je rotační přepínač. Ten mění polaritu proudu dvakrát v jednom cyklu. Díky změně polarity proudu se póly rotoru přitahují, potažmo odpuzují od permanentního magnetu na statoru a tím vzniká rotační pohyb rotoru podél jeho osy. Konstrukce komutátoru zajišťuje, že se síly působící na póly rotoru mají stále stejný směr. Během přepínání polarity zajišťuje pohyb rotoru jeho setrvačnost. Počet dříve zmíněných pólů má vliv na plynulost chodu (čím více pólů, tím plynulejší chod) a rozběhovou charakteristiku motoru (záběrový moment) [28].

Naopak střídavé motory obsahují permanentní magnety v rotoru a stator je osazen elektromagnety. Dále obsahují tři hnací cívky (každá pro jednu fázi) a řídicí elektroniku. Cívky elektromotoru jsou aktivovány jedna po druhé elektronickým regulátorem obsaženým v řídicí jednotce na základě polohy rotoru. Poloha se zjišťuje tak, že řídicí jednotka vysílá do vinutí motoru vysokofrekvenční impulzy a měří jejich odezvu [28].

Jejich hlavní výhodou je absence komutátoru, který je s rotorem u stejnosměrných motorů spojen pomocí uhlíků, jinak nazývaných kartáče (z anglického brush, odtud tedy název) a odpadá tedy nutnost na rotor přivádět proud. V případě použití u RC modelů jsou nejvhodnějším řešením právě střídavé motory. Bývají ukončeny kabelovým připojením a řídicí elektronika je usazena někde na těle stroje, protože je do ní svedeno vícero motorů, pro snadnější programování a kontrolu pohybů koptéry i stabilizačního zařízení. Nevýhodou je, že tato elektronika bývá značně komplikovaná [28].

Střídavé motory se vyrábějí ve dvou provedeních, s pevným (inrunner) a s rotačním (outrunner) pláštěm. Motory s pevným pláštěm dosahují velmi vysokých otáček, ale na druhou stranu také velmi malých krouticích momentů, proto se nejčastěji používají v kombinaci s převodovkou, která jejich otáčky snižuje a krouticí moment zvyšuje. Naproti



tomu motory s rotačním pláštěm dosahují sice nižších (ale stále dostatečných) otáček a vyšších krouticích momentů [28].

V RC modelech se tedy setkáváme nejčastěji s třífázovými střídavými motory s rotačním pláštěm (příklad uveden na Obr. 22). Často je u nich uvedena hodnota počtu otáček za minutu na jeden Volt na vstupu. Tato hodnota informuje o krouticím momentu motoru. Čím nižší číslo, tím více otáček slabšího drátu ve vinutí rotoru, které dokáží přenést větší napětí ale menší proud, což v konečném důsledku znamená, že motor s menšími otáčkami dokáže vyvinout větší moment [28].



Obr. 22: Motor Turnigy Outrunner C4240 [29].

### 2.2.2 Regulátory otáček trojfázových motorů

Vzhledem k faktu, že motory na RC MAV strojích jsou trojfázové, nelze je připojit rovnou na baterii či řídicí jednotku stroje. Jejich pohyb je tedy zajištěn pomocí regulátorů otáček, takzvaných ESC (z anglického Electric Speed Controller). Tyto regulátory získávají PPM<sup>9</sup> nebo PWM<sup>10</sup> signály z řídicích jednotek. Napájení regulátorů většinou zajišťuje hlavní baterie RC modelu. Jejich výstupem jsou tři kabely, které se zapojují přímo do třech fází rotoru. Přehozením sousedních dvou kabelů docílíme změny orientace otáček motoru. Důležité je dbát na správné dimenzování regulátoru, protože musí zvládnout proudové požadavky motoru a navíc by měl mít výkonovou rezervu [28].

Jak bývá dobrým zvykem, ESC často obsahují i doplňkové funkce, jako je například možnost jejich rychlého přenastavení za pomoci programové karty. Díky nim lze jednoduše nastavovat některé parametry pohybu rotoru, jako je například plynulost rozjezdu motoru, typ a napětí napájecí baterie případně ovládání brzdy a časování [28].

<sup>9</sup> PPM – z anglického Pulse Position Modulation – pulsně polohová modulace

<sup>10</sup> PWM – z anglického Pulse Width Modulation – pulsně šířková modulace

### 2.2.3 Napájení

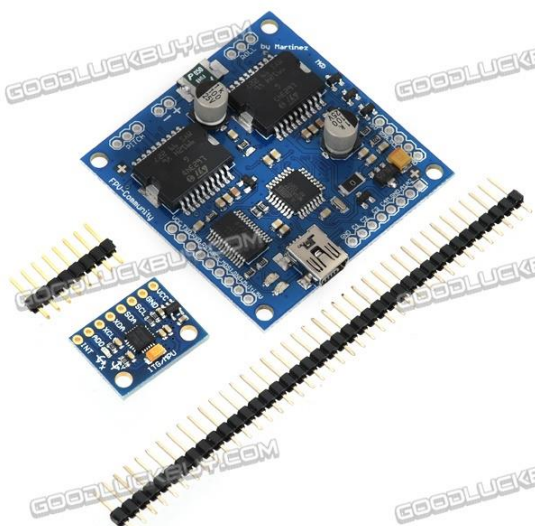
Zdroj energie bývá největším problémem při konstrukci MAV zařízení a jejich periférií. Nejčastěji se používají moderní Li-Ion<sup>11</sup> a Li-Pol<sup>12</sup> baterie. Tyto typy baterií jsou vhodné především svojí nízkou hmotností, vysokou kapacitou a schopností snést vysoké vybíjecí proudy. Naproti tomu jsou tyto vlastnosti vykoupeny vysokou pořizovací cenou.

Oba typy bývají vybaveny zabudovaným elektronickým obvodem, který chrání články proti přebití, přehřátí případně přílišnému vybití, které by mohlo vést až ke zničení celé baterie. Žádná z moderních technologií ale zatím neumožňuje nijak výraznou délku provozu, většinou se jedná o několik desítek minut, v závislosti na velikosti stroje, jeho výkonu a hmotnosti.

### 2.2.4 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka je vlastně takovým mozkiem celého zařízení (ať už se jedná o multikoptéru nebo o samotné stabilizační zařízení). Sbírá informace ze senzorů, tyto zpracovává a posílá dále do ESC regulátorů. Její návrh je komplexní a velmi složitý problém, navíc se na trhu pohybuje velké množství různých zařízení, které jsou různě vybavené a dovolují uživateli si tak vybrat jemu vyhovující řešení, nebudu se jí tedy v této práci zabývat.

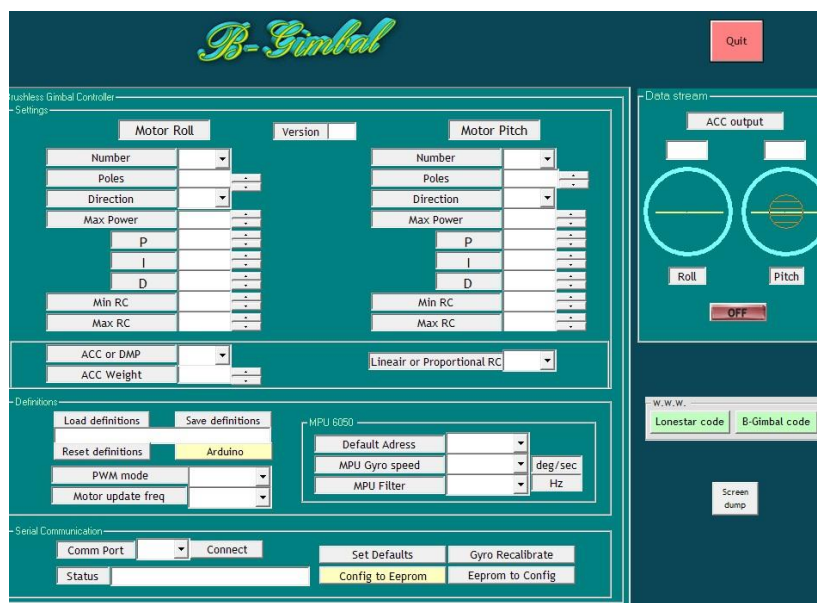
Vzhledem k hobby zaměření konečného návrhu FPV systému byl vybrán naprosto jednoduchý set B-Gimbal (jehož řídicí jednotka a ovládací a konfigurační rozhraní jsou na Obr. 23, Obr. 24 a Obr. 25) s možností připojení dvou ovládaných motorů. Má jednoduché uživatelské rozhraní a velmi příznivou cenu.



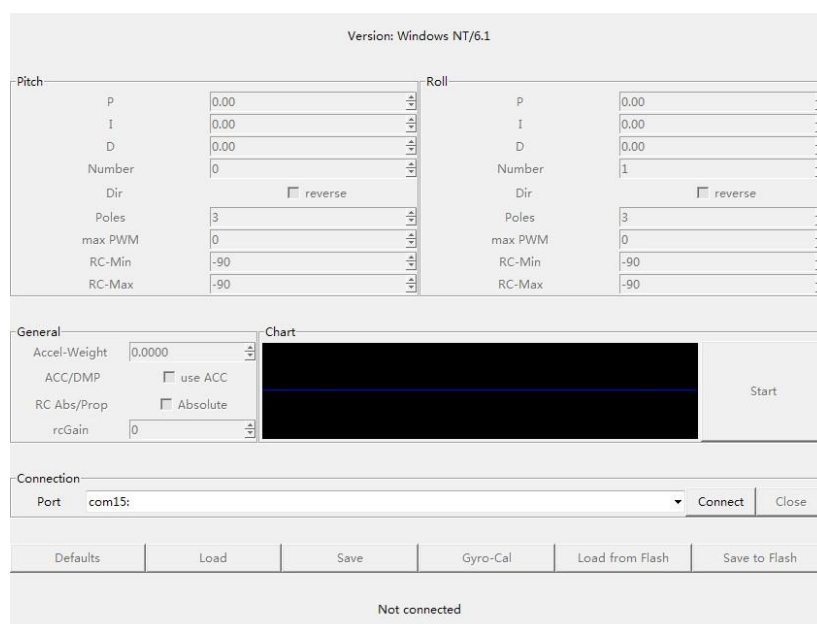
Obr. 23: Řídicí jednotka pro stabilizaci B-Gimbal [27].

<sup>11</sup> Li-Ion – baterie s technologií Lithium Ion

<sup>12</sup> Li-Pol – baterie s technologií Lithium Polymer



Obr. 24: Ovládací rozhraní setu B-Gimbal [27].



Obr. 25: Konfigurační rozhraní setu B-Gimbal [27].

### 2.2.5 Senzory

Stav celého MAV či FPV stabilizačního zařízení zjišťujeme pomocí množství senzorů. Můžeme je rozdělit do dvou základních kategorií. První kategorie jsou senzory, které jsou pro let nezbytně nutné (spadají sem gyroskopy a akcelerometry) a druhou kategorií tvoří senzory, které poskytují doplňkové funkce, případně zkvalitňují letové schopnosti.

Gyroskopy – senzory pro měření úhlové rychlosti. Poskytují informace o rychlostech okolo třech základních os a integrací těchto informací můžeme získat informaci o náklonu kolem os koptéry případně stabilizačního zařízení. Pokud známe vstupní podmínky, můžeme zjistit i náklon vůči zemskému povrchu, zde je však třeba klást velký důraz na filtraci vstupních dat a řádnou kalibraci gyroskopu, protože v případě zanesení velké vstupní chyby se nám tato chyba další integrací bude dále zvětšovat [30].

Akcelerometry – senzory umožňující měření zrychlení. Princip měření je následovný. V celém gravitačním poli země je přítomno tíhového zrychlení o velikosti přibližně  $9,81 \text{ ms}^{-2}$  kolmo k zemi (označováno také jako 1G). Pokud je akcelerometr nasměrován ve směru působení gravitačního pole země a nevykonává pohyb, naměří hodnotu právě 1G. Umístíme-li tedy 3 akcelerometry kolmo na sebe, můžeme přímo změřit náklon ve všech třech osách, protože výslednice zrychlení těchto tří akcelerometrů bude vždy právě 1G. Problém ovšem nastane, pokud se akcelerometr začne pohybovat. Velikost zrychlení akcelerometru se v ten moment sečte s velikostí tíhového zrychlení a výslednice se bude od 1G lišit [30].

Magnetometr – doplňkový senzor, který slouží k měření magnetického pole a díky tomu dokáže stabilizovat kurz MAV, protože se jedná o absolutní údaj vůči Zemi. Magnetometr se skládá ze tří senzorů, u kterých se využívá magnetorezistivního jevu [30].

Ultrazvukové a optické senzory – tyto senzory se používají především k identifikaci překážek a k měření rychlosti letu [30].

GPS<sup>13</sup> – GPS senzory slouží k určování polohy zařízení. Využívá principu triangulace, tedy určení bodu pomocí tří známých bodů, v tomto případě pomocí průsečíku tří kulových ploch, jejichž poloměr je stanoven měřenými vzdálenostmi jednotlivých družic. Každá družice nejenže vysílá radiové vlny k GPS přijímačům směrem k Zemi, ale také vysílá svoji aktuální polohu. A známe-li polohu tří družic a vzdálenost těchto tří družic od měřeného GPS přijímače, známe také polohu tohoto přijímače [30].

U MAV slouží zaprvé k určování jejich polohy, ale také pro možnost návratu na předem stanovený bod bez nutnosti zásahu pilota ze země (jakási forma autopilota).

---

<sup>13</sup> GPS – z anglického Global Positioning System

## 2.3 Záznamová a přenosová zařízení FPV systémů

### 2.3.1 CCD a CMOS kamery

Pro snímání a přenos obrazu lze na trhu nalézt velké množství kamer. Záznamových zařízení je takové množství, že by vydaly na jednu samostatnou závěrečnou práci, budeme se tedy věnovat pouze kamerám vhodným pro živý přenos obrazu. Je sice možné některá běžná záznamová zařízení nakonfigurovat tak, aby zároveň obraz živě přenášela (za nejnámější takto používaná zařízení lze asi označit iPhone 5S s velkým množstvím kitů a aplikací a pak pro sportovní a rekreační účely hojně využívanou kameru GoPro Hero 3). Velkou nevýhodou je ale vysoká kvalita nahrávání a tudíž obrovské zpoždění obrazu, což tato zařízení činí velmi nepraktickými.

Principy kamer pro přenos živého záznamu můžeme rozdělit na dva základní – kamery s technologií CMOS a kamery s technologií CCD (oba typy se prodávají v provedení NTSC a PAL – evropská norma s nižší obnovovací frekvencí, ale více řádků obrazu).

CMOS kamery – kamery s CMOS senzorem vynikají svojí nízkou energetickou náročností, vysokou kvalitou obrazu a nízkou vahou. Bohužel jsou velmi náchylné na vibrace, které na MAV strojích nelze eliminovat. Díky tomu je obraz přenášený z CMOS kamer rozřesený a v podstatě nepoužitelný pro pilotování. Existují samozřejmě i kvalitnější CMOS kamery, které tento takzvaný „jello“ efekt eliminují na úplně minimum, ale jejich cena je ve srovnání s CCD kamerami několikanásobně vyšší.

CCD kamery – tyto kamery fungují na stejném principu jako kamery filmové, tudíž netrpí „jello“ efektem. Jejich nevýhodou je ale vyšší energetická náročnost, v prolnání s CMOS jsou větší, mají nevýrazné barvy a v přímém protisvětle zobrazují vertikální prosvětlené čáry. To ovšem dokáže lehce vyvážit cena, častá přítomnost nočního režimu a fakt, že na pilotování malého MAV není potřeba obraz ve vysokém rozlišení, proto jsou také nejčastěji používány.

### 2.3.2 Přenos signálu

Přenos video signálu je možný na celkově čtyřech frekvencích: 900 MHz, 1,2 GHz, 2,4 GHz a 5,8 GHz. Ovšem tyto frekvence mají jistá omezení. V ČR je například frekvence 900 MHz vyhrazena mobilním operátorům. Na nízkých kanálech 1,2 GHz frekvence funguje letecká navigace, hrozí tedy, že budeme rušit letový provoz. Vhodné jsou poslední dvě frekvence s tím, že nejméně využívanou a tedy i nejvolnější je frekvence 5,8 GHz, ale je zde nutno počítat s vysokým útlumem rádiových vln a tedy i krátkým dosahem.

Nejvhodnějším kandidátem se tedy zdá být frekvence 2,4 GHz, ale i zde je třeba upozornit na dvě úskalí a to, že je v poslední době díky velkému nárůstu RC modelářů čím dál tím plnější a také ji nelze kombinovat s RC ovládním MAV na frekvenci 2,4GHz.

### **2.3.3 LCD a brýle**

K FPV systémům lze dokoupit velké množství doplňků, mezi ty hlavní patří pravděpodobně video brýle, které nahrazují standardní LCD displeje, tedy brýle, které přenáší obraz přímo před oči pilota a umožňují tak maximální možné propojení pilota s MAV. Společně Headtrackerem, což je senzor vyhodnocující pohyby hlavy, jde poté o technicky velmi vyspělý systém, protože řídicí jednotka stabilizačního systému dokáže na Headtracker reagovat a podle pohybu hlavy pilota směřovat FPV kameru požadovaným směrem.

### 3 VSTUPNÍ PARAMETRY NÁVRHU

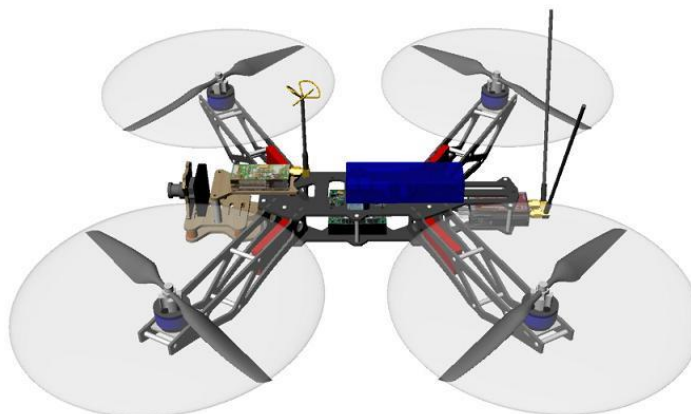
Tato kapitola se bude podrobně věnovat vstupním parametrům konstrukčního návrhu.

#### 3.1 Stávající stav na trhu

Momentálně se na trhu nachází velké množství stabilizačních systémů od různých firem s různými stupni výbavy pro různá snímací zařízení různých velikostí. Můžeme je rozdělit na tyto základní typy dle konstrukce:

##### Pevný systém

Funguje pouze jako držák FPV kamery, bez možnosti pohybu a musí být nastaven požadovaným směrem před vzlétnutím. Nebývá vybaven žádnou elektronikou. Příklad helikoptéry s pevně uchycenou FPV kamerou je uveden na Obr. 26 níže.



Obr. 26: Quadkoptéra s nepohyblivým držákem FPV kamery [31].

##### Stabilizační systém s jednou osou otáčení

Jedná se o systémy, kdy se kamera může otáčet buď kolem svislé osy doleva a doprava nebo kolem vodorovné nahoru a dolů. Zpravidla nebývá vybaven polohovacím zařízením, tedy v případě, kdy se stroj pohne některým směrem, kamera nedokáže fixovat původní směr a natočí se také. Jeden ze zástupců tohoto typu je zobrazen na Obr. 27.



Obr. 27: Quadkoptéra s jednoosým naklápěcím systémem [32].

#### Stabilizační systém se dvěma osami otáčení

U toho systému je již možnost natáčet kameru podél dvou os, nejčastěji naklápět nahoru a dolů a poté natáčet kolem vodorovné osy rovnoběžné se směrem letu. Vyžaduje řídicí systém a senzory pro definici polohy. Díky své ceně, relativní jednoduchosti a širokému rozsahu použití jsou tyto typy nejčastěji využívány (viz Obr. 28).



Obr. 28: Gimbal Steady Cam pro kameru GoPro Hero [33].



### Stabilizační systém se třemi osami otáčení

Nejsložitější řešení, koncepčně vycházející z předchozího typu, které ovšem umožňuje otáčet kamerou ve všech třech základních osách a umožňuje tak zabírat kompletně celé okolí MAV. Musí mít poměrně sofistikovanou řídicí jednotku, která dokáže ovládat 3 stabilizační motory. Tyto konstrukce pak většinou umožňují i fixaci kamery jedním směrem nezávisle na pohybu MAV. Tyto systémy ovšem nalézají často využití i při pozemním natáčení takzvaně „z ruky“, stačí pouze opatřit je rukojetí pro uchopení (viz Obr. 29). Umožňují tak snímání stále stejného objektu i přes to, že se kameraman musí během natáčení vyhýbat například překážkám a zároveň dokáží díky stabilizaci výrazně pozvednout kvalitu záběru.



Obr. 29: Tříosé stabilizační zařízení s rukojetími [35].

Pro tuto diplomovou práci byla vybrána dvouosá konstrukce, protože snímací zařízení nebude sloužit jen pro navádění pilota, ale spíše jako pomůcka pro natáčení. Pilot a kameraman v jedné osobě tak po dosažení požadované destinace bude FPV kameru natáčet tak, aby věděl, co snímací kamera snímá, obě tyto kamery budou tedy umístěny vedle sebe na stejné ploše.

## 3.2 Popis stávajících komponent

Tato část diplomové práce popisuje vstupní parametry pro konstrukci, neboli komponenty, které budou na stabilizační systém připevněny, případně ke kterým bude stabilizační systém přimontován.

### 3.2.1 Snímací kamera

Jako snímací kamera bude použita velmi oblíbená kamera GoPro Hero 3 HD (kamera je vyobrazena na Obr. 30), kterou majitel hexakoptéry, na kterou bude stabilizační systém montován, disponuje. Tato kamera se těší velké oblíbenosti a má špičkové parametry. Vyniká nízkou hmotností, vestavěným WiFi modulem, displejem, který slouží pro možnost rychlého nastavení snímání bez nutnosti kameru připojit k PC a mnoho dalších parametrů. Navíc je k těmto kamerám dostupné na trhu velmi široké spektrum příslušenství. Použitý model v diplomové práci byl stažen ze stránek [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com), což je stránka, na které uživatelé sdílejí vytvořené 3D modely pro použití širokou veřejností. Jeho rozměry byly ověřeny na stránkách výrobce a na fyzickém modelu kamery. Základní parametry kamery viz Tabulka 1.

Přichycení kamery bylo navrženo pomocí dodávaného textilního pásku, ovšem existuje i možnost použití plastového montážního krytu, který chrání kameru před povětrnostními vlivy, tento ovšem poté omezí možnosti natočení kamery.

Tabulka 1: Parametry kamery GoPro Hero 3 HD.

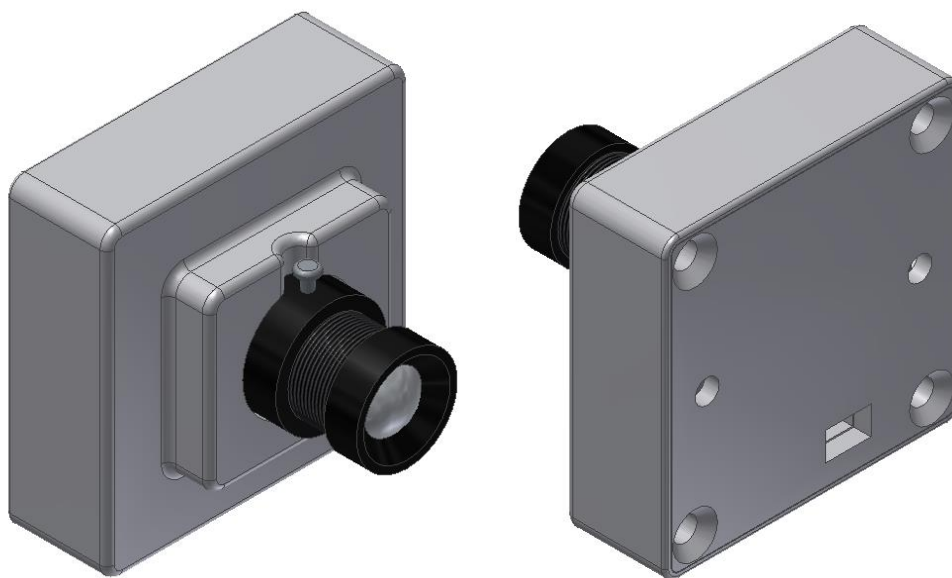
Vlastnost	Hodnota
Hmotnost kamery	74g
Hmotnost kamery s ochranným krytem	136g
Rozměry kamery (š x v x h)	60 x 42 x 28 [mm]
Rozlišení videa	1080p, 960p, 720p, WVGA
Počet snímků za sekundu (fps)	Dle rozlišení 25-60fps
Rozlišení snímku videa	848x848 až 1920x1080
Rozlišení fotek	5 Megapixelů
Rozlišení snímku statické fotky	2592x1944
Baterie	Li-Ion, 1050mAH, 3885mWH
Výdrž	Dle nastavené kvality snímání až 3h



Obr. 30: Kamera GoPro Hero 3 HD s a bez ochranného krytu [36].

### 3.2.2 CCD kamera

Bude použita kamera 1/3-inch SONY CCD (NTSC) s vlastním ochranným krytem, viz Obr. 31, vyrobeným z ABS plastu. Kryt byl navržen ve stejném softwaru, jako stabilizační systém, tedy v programu Autodesk Inventor 2014. Kamera bude napojena na FPV systém RC305 (200mW, 5,8GHz). Základní parametry kamery viz Tabulka 2.

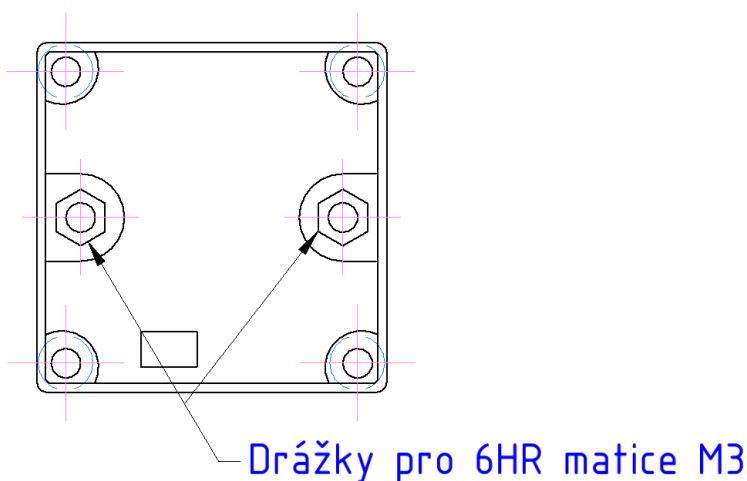


Obr. 31: 3D model použité CCD kamery v plastovém ochranném krytu.

Tabulka 2: Parametry FPV CCD kamery.

Vlastnost	Hodnota
Hmotnost kamery s ochranným krytem	30g
Rozměry kamery s ochr. krytem (š x v x h)	42 x 42 x 35 [mm]
Režim videa	NTSC
Synchronizace	Interní
Světelnost	0,01LUX/F1,2
Rozlišení snímku videa	510 x 492 pixelů
Gamma	0,45
Vyvážení bílé	Automaticky
DSP + CCD čipy	CXD3142R + 405AK
Čočka	3,6 mm
Audio	Ne
Vstupní napětí	9 – 12,6 V
Proud	80 mA
Video výstup	1,0VP-P kompozitní
Teplota použití	-20°C - +50°C
Výdrž	60 min/100 mAh 3S

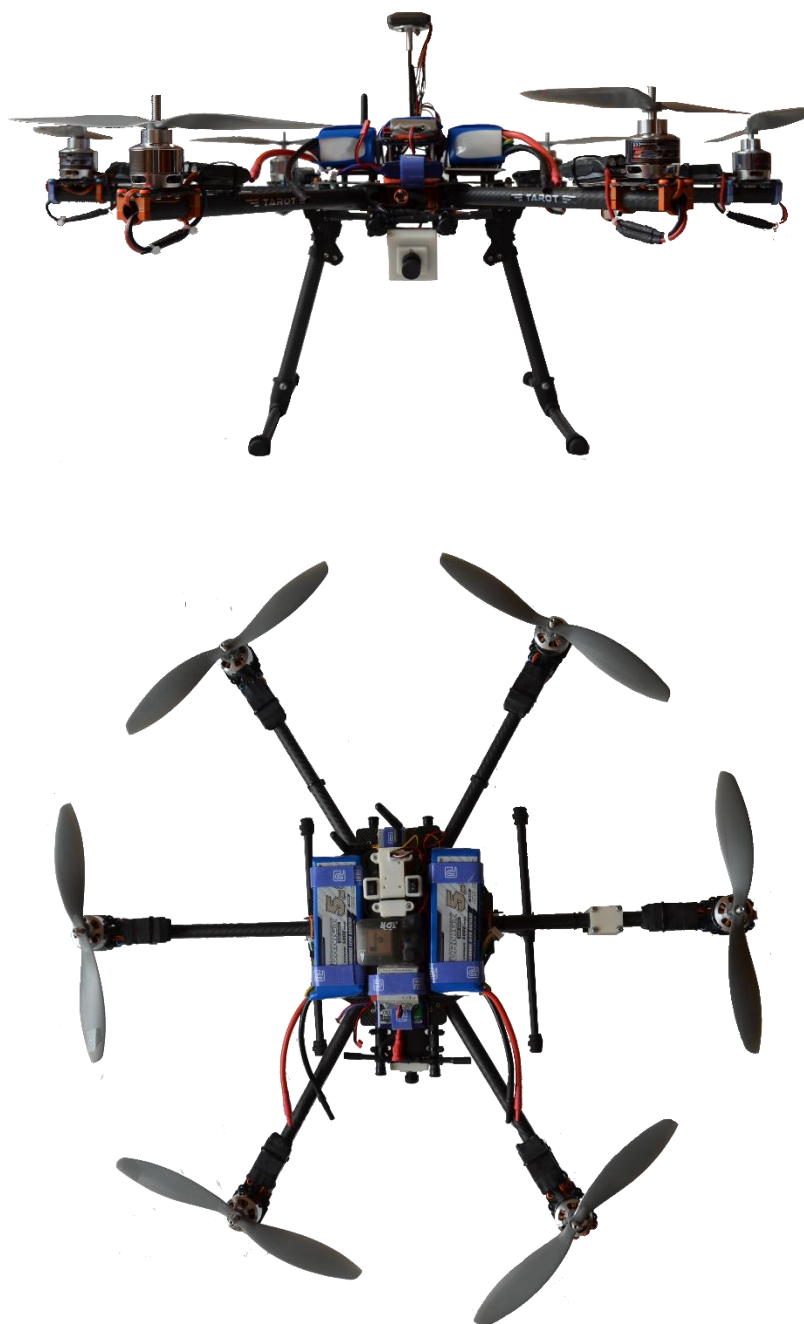
K montáži kamery ke stabilizačnímu zařízení slouží dvě kruhové díry ze zadní strany o průměru 3,4mm, za nimiž jsou 6HR matice se závitem M3, umístěné ve tvarové drážce proti pootočení. Detail uchycení matic viz Obr. 32 níže.



Obr. 32: Detail drážek ochranného krytu CCD kamery.

### 3.2.3 Hexakoptéra

Stabilizační zařízení bude připevněno na rám hexakoptéry Tarot 680s celokarbonovým rámem a 6 motory Turnigy osazenými vrtulemi APC. Obrázek a základní parametry hexakoptéry viz Obr. 33 a Tabulka 3: Základní parametry hexakoptéry. Tabulka 3.



Obr. 33: Použitá hexakoptéra - pohled zepředu a shora.

Tabulka 3: Základní parametry hexakoptéry.

Rám	Tarot 680, celokarbonový
Průměr opsané kružnice rámu	680 mm
Průměr opsané kružnice včetně vrtulí	708 mm
Výška modelu	430 mm
Hmotnost modelu (včetně baterií)	3,9 kg
Nosnost modelu (nad vlastní hmotnost)	8 kg
Vrtule	APC 11x4,7“ (průměr x stoupání)
Sada baterií	2x Li-Pol pack 4S 5000mAh
Délka letu na jednu sadu baterií	10-15 minut
Motory	6x Turnigy 3536 1200 (střídavé)
Vysílač	Hitech Aurora 9
Přijímač	Hitech Optima 9
Pilotní systém	Ardupilot Mega AMP 2,6

### 3.3 Původní návrhy

Jako každý vývojový projekt i tento prošel několika verzemi. Úplně původní verze vycházely z poznatků a vzorů, které jsou k nalezení na webových stránkách prodejců a výrobců těchto stabilizačních systémů.

První verze - byla v podstatě tím nejjednodušším, co lze vymyslet. Koncepce vychází z dvou základových desek, které jsou k sobě připevněny pomocí tlumicích elementů, aby eliminovaly vibrace MAV přenášené na snímací kameru (v prvním kole ještě nebyla FPV kamera uvažována, šlo pouze o prvotní koncept, ze kterého se mělo vycházet). Mezi tyto desky byla vložena řídicí jednotka, přišroubována přes plastové distanční válečky ke spodní desce. Horní i spodní deska jsou shodné a jsou na nich vytvořeny výřezy tak, aby bylo možné přišroubovat jak svislé rameno s držákem kamer, tak základovou desku tak i držáky pro uchycení stabilizačního zařízení k hexakoptéře.

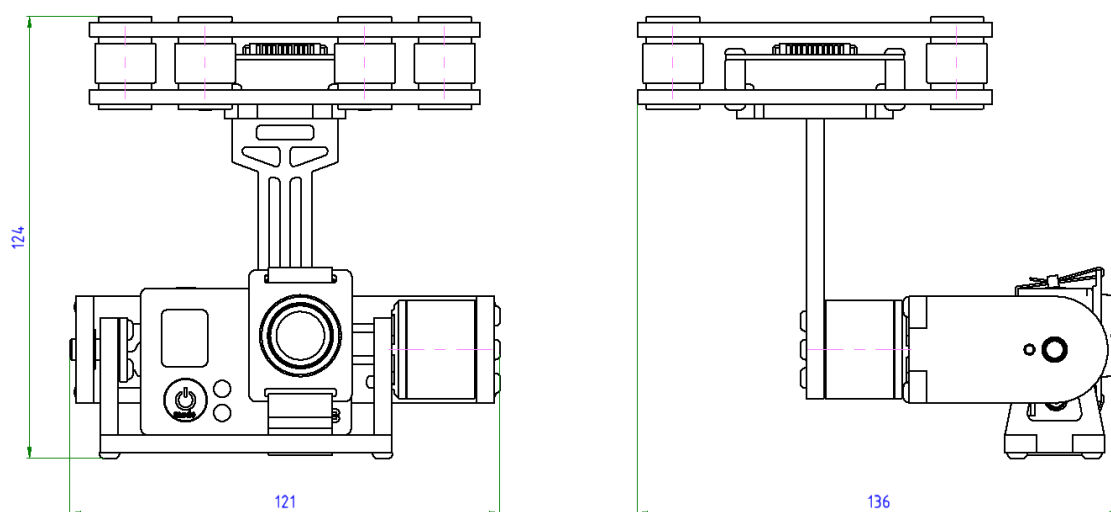
Ke spodní základové desce je přes konzoli přišroubováno svislé rameno, na jehož druhém konci je šrouby uchycen první motor, dovolující otáčení kolem vodorovné osy. K němu je z druhé strany přišroubována horizontální kolébka, sloužící jako nosná konstrukce pro poslední motor a konzoli s kamerou. Je složena ze tří kusů, základní desky a dvou ramen, přičemž jedno rameno má sloužit k uchycení motoru a druhé k uložení kovového čepu. K tomu to rameni je přišroubováno kluzné pouzdro Iglidur G GFM-0607-045, které bylo použito pro všechny navazující návrhy. Detail uchycení čepu v pouzdře viz Obr. 38.

Kolébka držící snímací kameru je v podstatě zmenšenou verzí horizontální kolébky, taktéž obsahuje dvě ramena a základovou desku. Deska má výřezy na textilní pásek, kterým se uchycuje kamera, tyto výřezy jsou ale rozmístěny tak, aby skrze ně šla zespodu přišroubovat i konzole s ochranným rámečkem kamery.

Všechny desky byly navrženy ze slitiny hliníku o tloušťce 4 a 5mm s následnou povrchovou úpravou, eloxováním. Díly jsou k sobě přišroubovány šrouby velikosti M3 různých délek s půlkulatou hlavou a vnitřním šestihranem. Zatížení spojů je odlehčeno díky tomu, že jednotlivé díly mají výřezy a výstupky, které do sebe vzájemně zapadnou a vzniklé plochy, které se o sebe opírají, eliminují síly zatěžující šrouby. Konkrétním výrobním materiálem a metodikou se budu zabývat až v poslední kapitole a bude se vztahovat ke konečnému návrhu. Náhled celého návrhu a jeho základní rozměry jsou vyobrazeny na Obr. 34 a Obr. 35.



Obr. 34: 3D pohled první verze stabilizačního mechanismu.

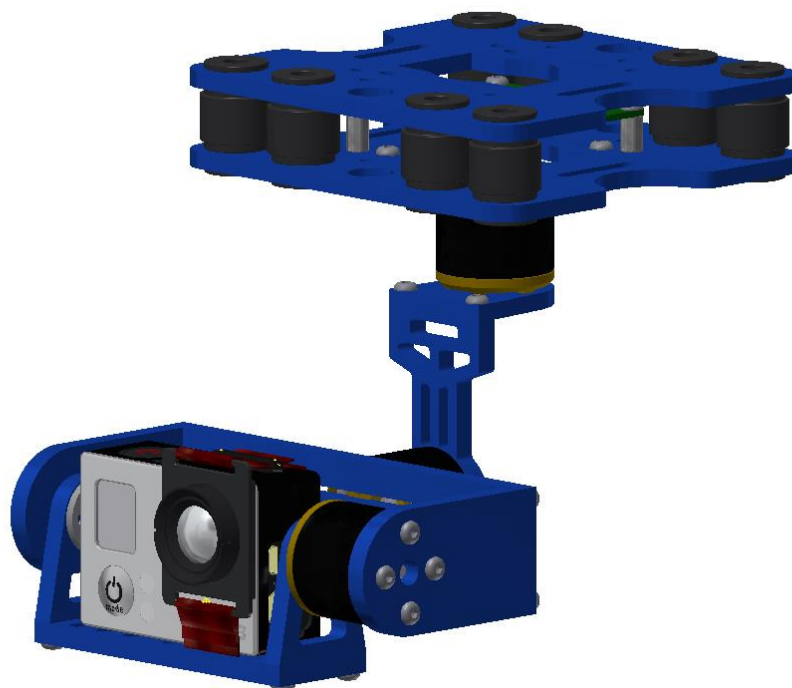


Obr. 35: Základní rozměry první verze.

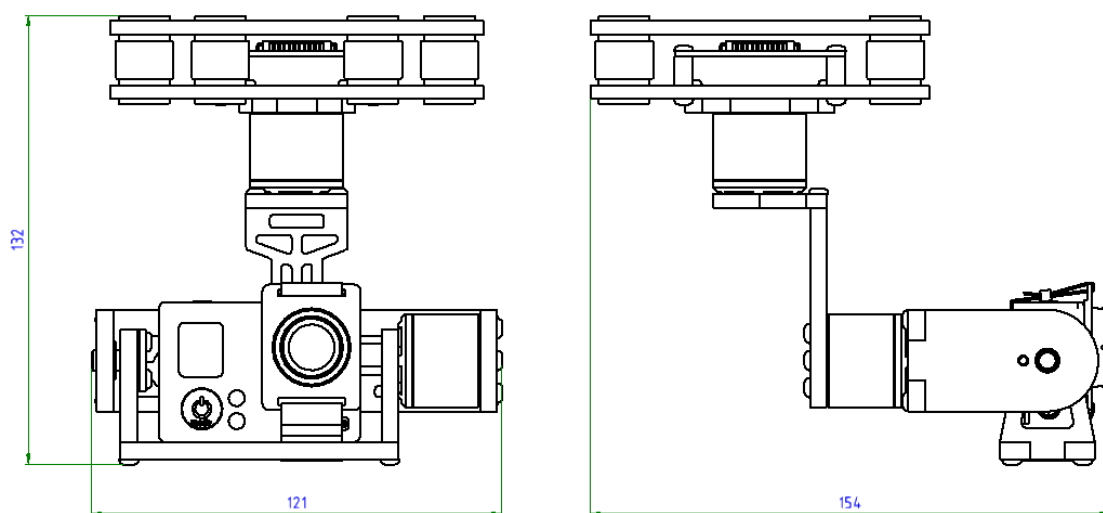
Druhá verze – jedná se vlastně jen o rozšíření první verze, kdy byl jednoduchou modifikací doplněn motor pro otáčení v třetí ose (náhled a základní rozměry naleznete na Obr. 36 a Obr. 37). Princip konstrukce je stejný, obě verze mají mnoho společných dílů. Tato verze má tu výhodu, že lze kameru natáčet o  $360^\circ$  kolem všech tří os, což ovšem v reálu není možné, protože jednotlivé motory jsou k řídicí jednotce, umístěné mezi základními deskami, připojeny pomocí kabelů a při více otočeních kolem jedné z os o  $360^\circ$  by mohlo dojít buď k rozpojení, nebo v horším případě k poničení jednotlivých komponent. Další nevýhodou je umístění těžiště úplně mimo osu svislou základových desek, což by mohlo vést k potížím s umístěním tlumicích elementů (na jedné straně by byly moc stlačené a na opačné moc roztažené).

Níže, na Obr. 39, je ještě vyobrazen řezný plán, který dokumentuje společnou základnu dílů u obou prototypových variant.

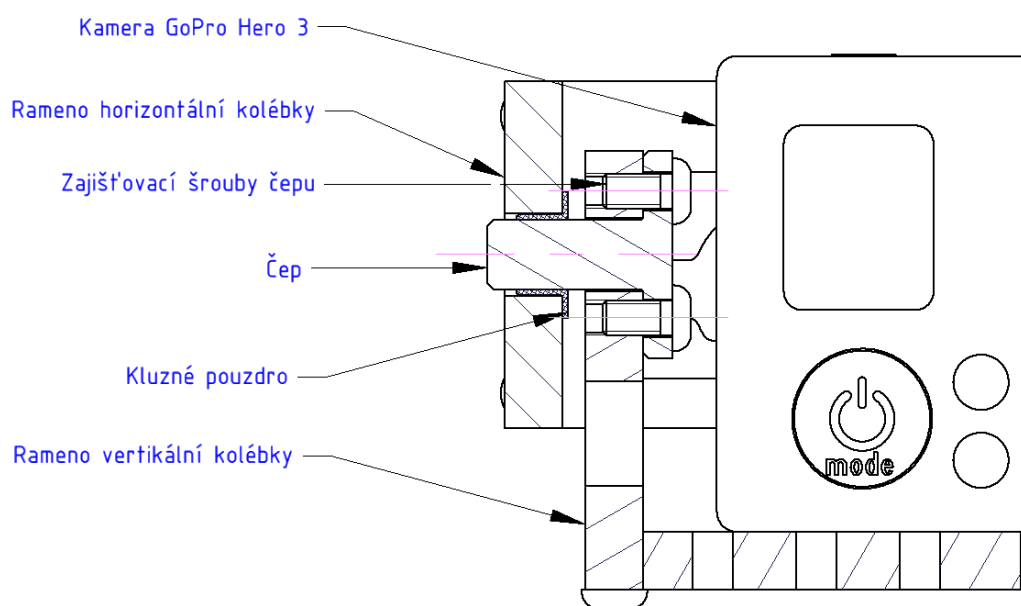




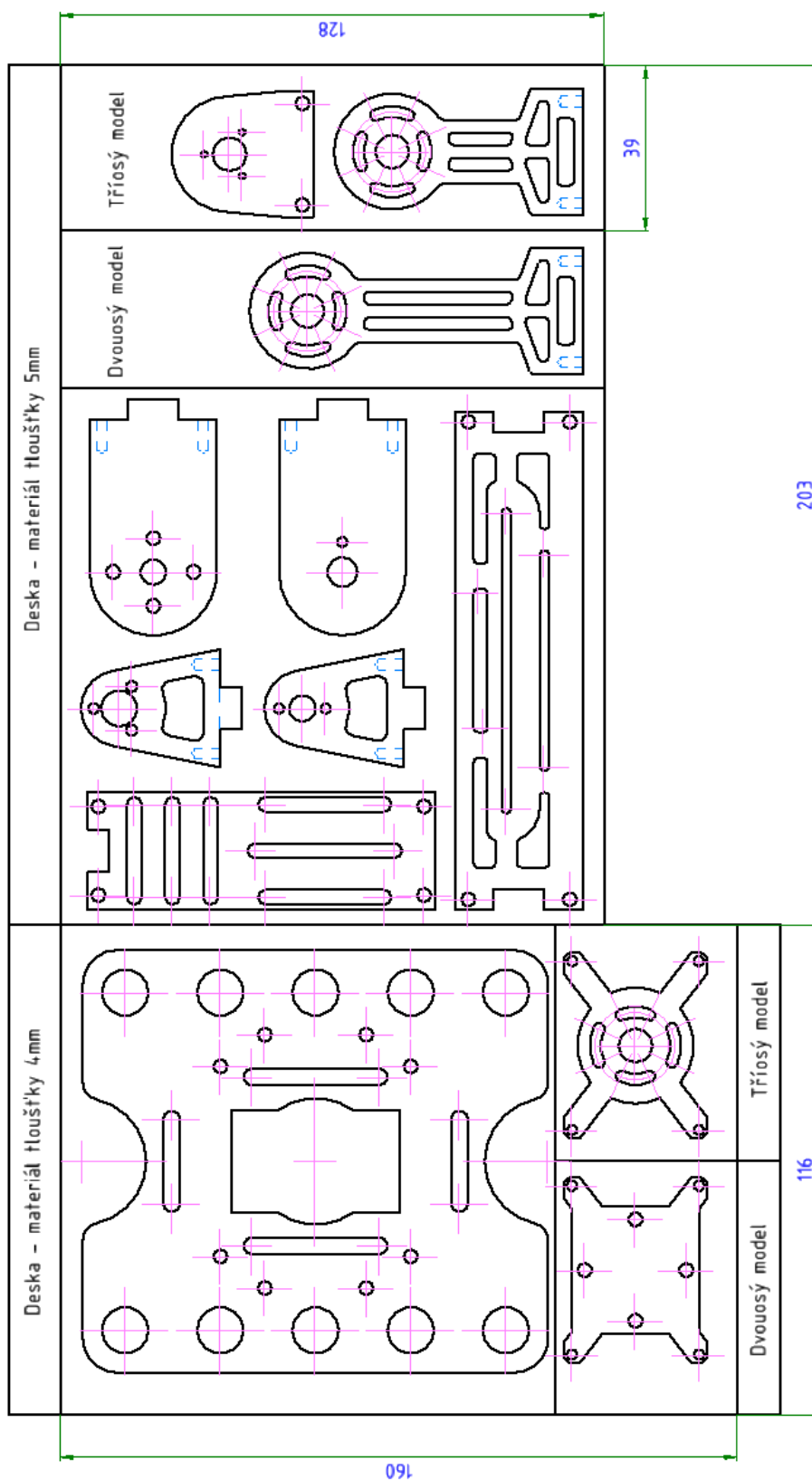
Obr. 36: 3D pohled na druhou verzi.



Obr. 37: Základní rozměry druhé verze.



Obr. 38: Detail uchycení čepu.



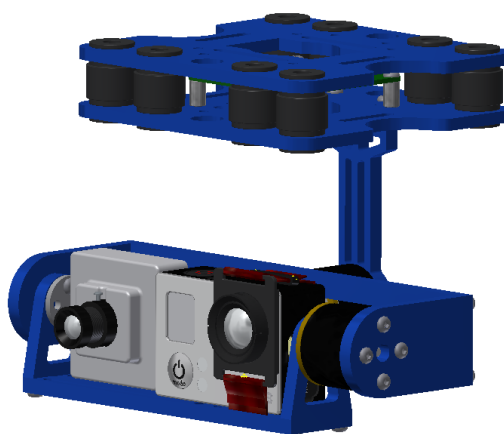
Obr. 39: Pohled na přibližný řezný plán dílů pro první a druhou verzi stabilizačního mechanismu.

## 4 KONSTRUKČNÍ NÁVRH STABILIZAČNÍHO SYSTÉMU

Pro účely této diplomové práce byly zpracovány dvě verze stabilizačního mechanismu. Liší se od sebe jak konstrukčně, tak použitými materiály tak i následnou navrhovanou výrobou. V této části si podrobněji přiblížíme jejich koncepci. S vedoucím práce bylo dohodnuto, díky použití řídicí jednotky schopné ovládat pouze dva motory, že se realizuje návrh provedení se dvěma osami otáčení a s omezenou možností natočení kolem horizontální osy vodorovné s osou letu.

Návrhy byly zpracovány v softwaru společnosti Autodesk, Inventor Professional 2014. Tento software se v praxi osvědčil pro návrh jednodušších, tvarově nenáročných součástí. Navíc ve verzi Professional umožňuje kontrolu zatížení simulací metodou konečných prvků, takzvanou FEA<sup>14</sup> analýzu.

### 4.1 Varianta 1



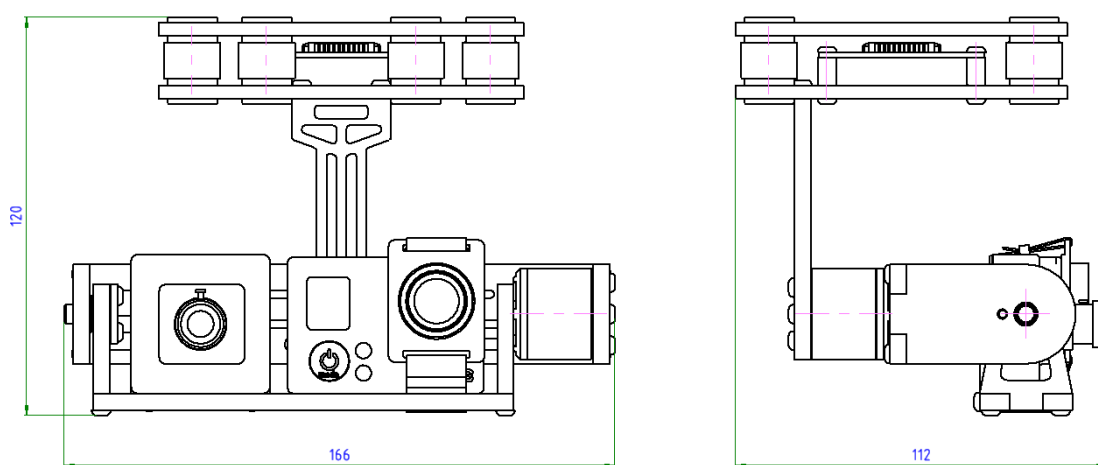
Obr. 40: Konečná verze - varianta 1.

Jak je vidět na Obr. 40, první varianta konečné verze z velké části vychází z původních návrhů. Na první pohled je patrný jasný rozdíl a to v použití dvou kamer, jak kamery snímací, tak již i kamery pro použití FPV systému. Varianta má omezení otáčení kolem jedné osy na 50° na jednu a na druhou stranu (viz Obr. 42), což ovšem pro snímání objektů pod hexakoptérou plně vyhovuje. Kolem druhé osy je možno kameru natáčet o 360° (viz Obr. 43). Základní rozměry a parametry varianty 1 viz Obr. 41 a Tabulka 4.

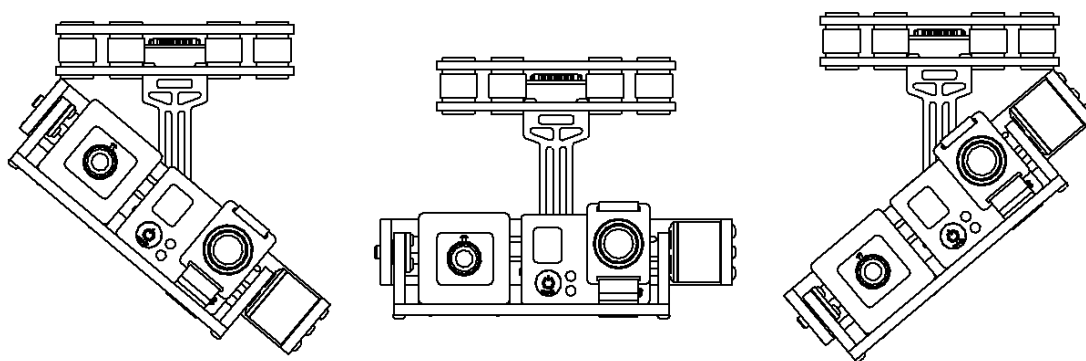
<sup>14</sup> FEA - z anglického Finite Element Analysis, analýza konečných prvků

Tabulka 4: Základní parametry varianty 1.

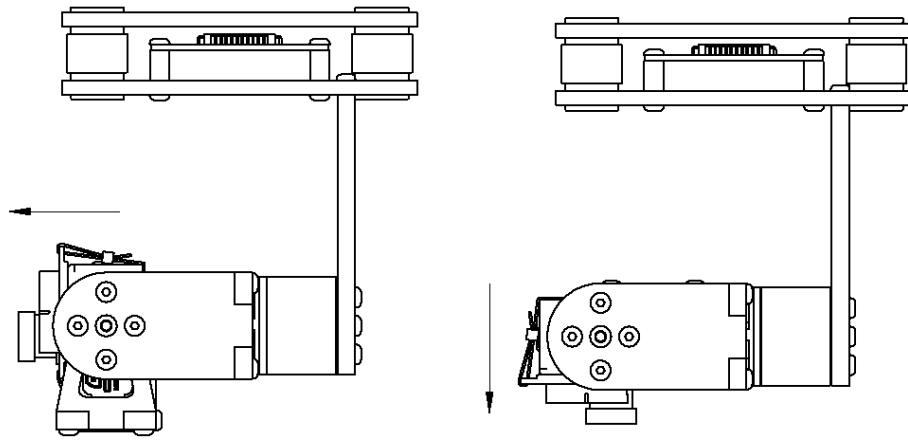
Parametr	Hodnota
Hmotnost s kamerami	695 g
Hmotnost bez kamer	532 g
Šířka	166 mm
Výška	120 mm
Hloubka	112 mm



Obr. 41: Základní rozměry varianty 1.



Obr. 42: Natočení kamer kolem horizontální osy vodorovné s osou letu (-50°; +50°).

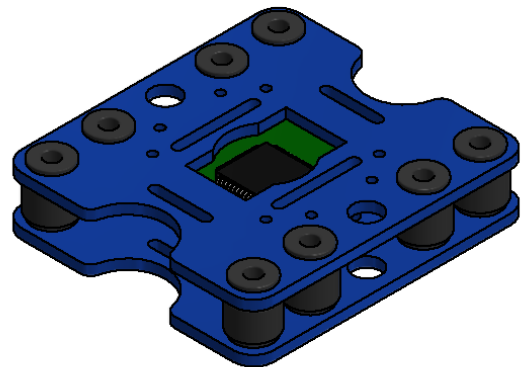
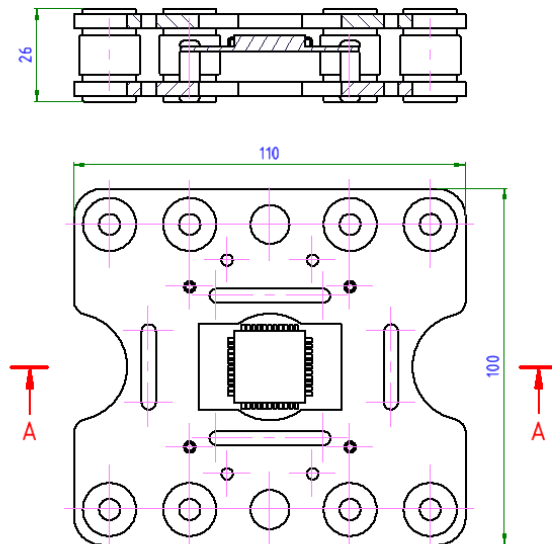


Obr. 43: Natočení kamer kolem horizontální osy kolmé k ose letu ( $360^\circ$ ).

#### 4.1.1 Základní komponenty varianty 1

##### Základna

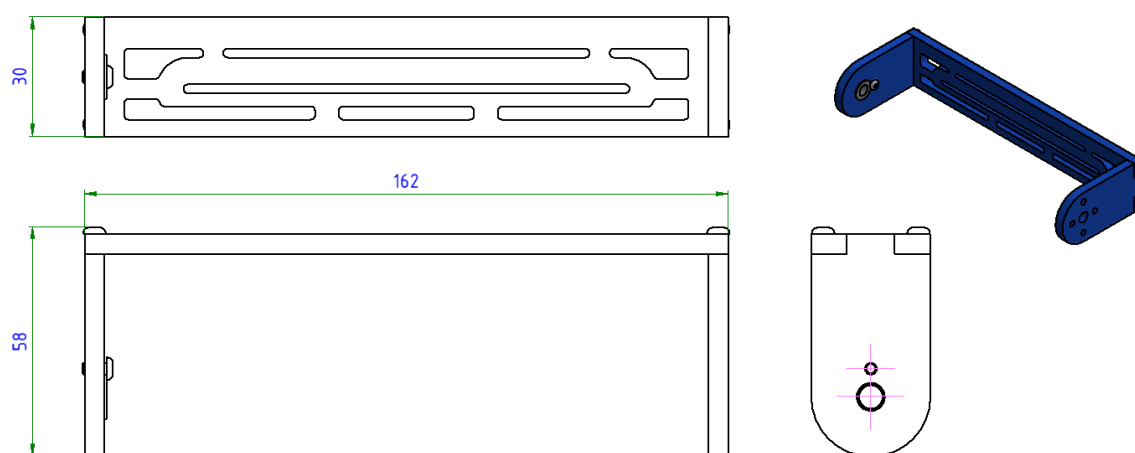
A-A (1:1)



Obr. 44: Základna varianty 1.

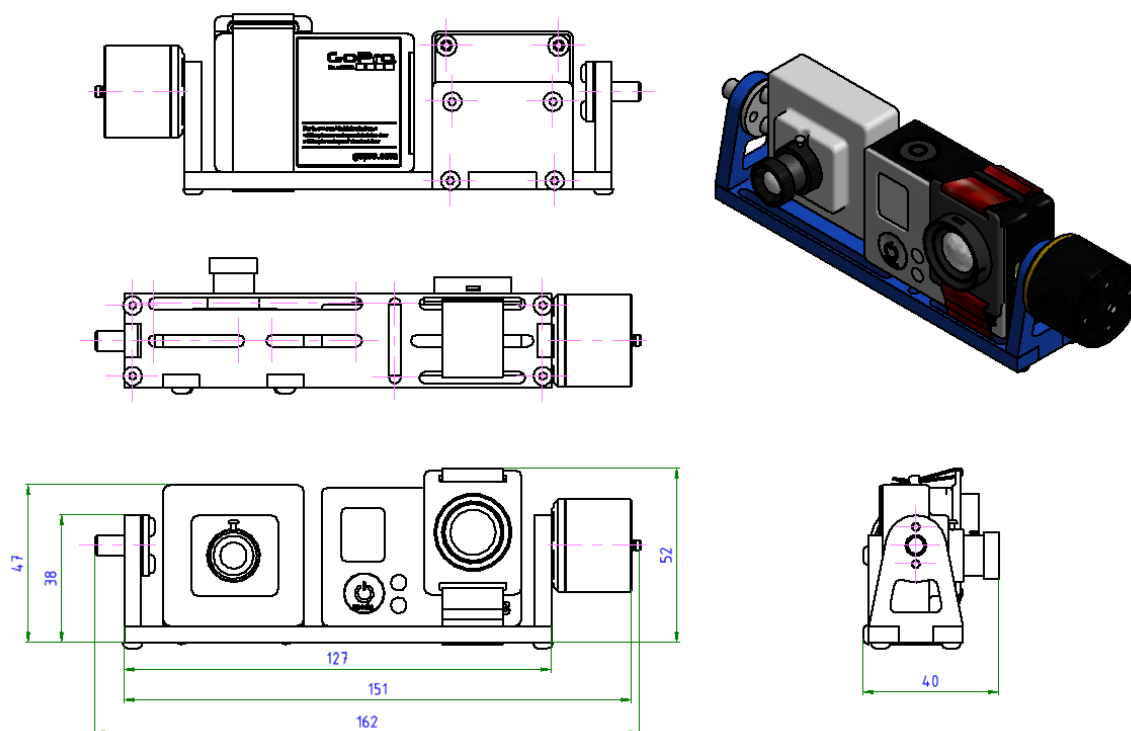
Základna je složena ze dvou totožných základových desek tloušťky 4mm spojených pomocí tlumicích elementů, mezi základové desky je namontována řídicí jednotka, která je umístěna na čtyřech distančních plastových válečcích přišroubovaných pomocí šroubů M3x6 (viz Obr. 44). Desky jsou totožné a jejich výřezy jsou navrženy tak, aby byly desky pevné a co nejlehčí. Základnu lze, dle potřeby, osadit 4 – 10 tlumicími elementy.

### Kolébka horizontální



Obr. 45: Horizontální kolébka varianty 1.

Horizontální kolébka je tvořena základní deskou a dvěma skoro totožnými rameny, z nichž jedno slouží k přišroubování motoru a druhé k uchycení kluzného pouzdra Iglidur G (viz Obr. 45). Pouzdro je zajištěno šroubem M3x6, který jej přitlačí za osazení (viz dříve zmíněný **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Ramena jsou k základní desce přišroubována rouby M3x10, co nejpevnější spojení zajišťují výřezy a drážky na všech dílech, které do sebe zapadají. Dvě dlouhé podélné drážky na základní desce slouží k přišroubování motoru, kolem kterého se kolébka otáčí. Správným polohováním lze dosáhnout toho, že se těžiště kolébky a k ní namontovaných komponent dostane do osy otáčení, což výrazně sníží namáhání motoru.

Kolébka vertikální

Obr. 46: Vertikální kolébka varianty 1.

Vertikální kolébka se, stejně jako horizontální, skládá ze základní desky a dvou ramen (viz Obr. 46). Navíc je opatřena kolmou deskou pro přišroubování FPV CCD kamery. Ramena a základní deska mají tloušťku 5mm, kolmá opěrná deska pak 4mm. GoPro kamera je přichycena textilním páskem protaženým výřezy v základní desce s plastovým rámečkem za objektiv, nicméně výřezy dovolují montáž i s ochranným krytem dodávaným s kamerou, tato varianta ovšem omezí úhel otáčení kolébky. Jednotlivé díly jsou k sobě sešroubovány šrouby M3x8 a M3x10 a stejně jako v předchozím případě jsou opatřeny do sebe zapadajícími výřezy. Každé z ramen má jinou funkci, jedno slouží k uchycení motoru, který kolébkou otáčí, do druhého je našroubován ocelový čep. Při navrhování bylo uvažováno i nad variantou s uchycením kolébky pouze na jedné straně, takzvaně letmo, ale tato myšlenka byla kvůli délce kolébky opuštěna. K této kolébce je navíc nutné ještě přišroubovat čip pro snímání polohy, pro tento případ jsou na základní desce vytvořeny výřezy navíc, které mimo jiné plní i odlehčovací funkci.



### 4.1.2 Uvažovaný materiál a povrchová úprava

Vzhledem k jasným požadavkům na mechanické vlastnosti stabilizačního systému byla jako materiál pro výrobu zvolena hliníková slitina hliníku a hořčíku AW-5754 H111 (označení dle EN 573-1). Materiál má velmi dobrou pevnost, je dobře obrobitelný a lze jej zakoupit ve formě plechů, pro výrobu je tedy vhodný již z toho důvodu, že lze z plechového polotovaru laserem vyřezat jednotlivé díly a do těch pak následně již jenom dodělat otvory se závit, což snižuje nákladnost oproti nutnosti frézování každého dílu zvlášť. Jako povrchová úprava bylo navrženo eloxování, které ochrání povrch proti oxidaci a zároveň působí velice esteticky. Navíc lze již od výrobce požadovat eloxovaný plechový polotovar, což může buď snížit náklady na pořízení vybavení pro eloxování, případně omezit náklady na expedici dílů do kooperace na opracování a zpět. Na výběr je na trhu mnoho barev, tudíž se lze přizpůsobit přání zákazníků.

### 4.1.3 Analýza FEA

Na závěr konstrukčního návrhu je třeba vždy jakýmsi způsobem zkontrolovat před vyrobením jeho funkčnost. K tomuto účelu byl využit modul softwaru Autodesk Inventor Professional 2014 a k návrhu byla zpracována analýza zatížení metodou konečných prvků. V diplomové práci jsou uvedeny pouze vybrané výstupy z analýzy, protože jako taková má celková analýza přes 40 stran (převážně se jedná o obrazové výstupy).

#### Vstupní parametry analýzy FEA:

Pevná vazba byla umístěna na horní základovou desku, zatížení vertikální kolíčky kamerami bylo nahrazeno plošným zatížením v místě styku. Dále bylo zahrnuto zatížení vlastní vahou. Níže jsou uvedeny základní vstupní fyzikální parametry analýzy (viz Tabulka 5).

Tabulka 5: Fyzikální vstupní parametry analýzy FEA varianty 1.

Parametr	Hodnota
Hmotnost	0,694013 kg
Plocha	185109 mm <sup>2</sup>
Objem	253104 mm <sup>3</sup>
Těžiště	x=4,69792 mm y=20,9263 mm z=45,5451 mm
Prům. velikost prvku (zlomek průměru modelu)	0,5
Min. velikost prvku (zlomek prům. velikosti)	0,2
Použití pro síť sestavy měření založená na součástech	Ano

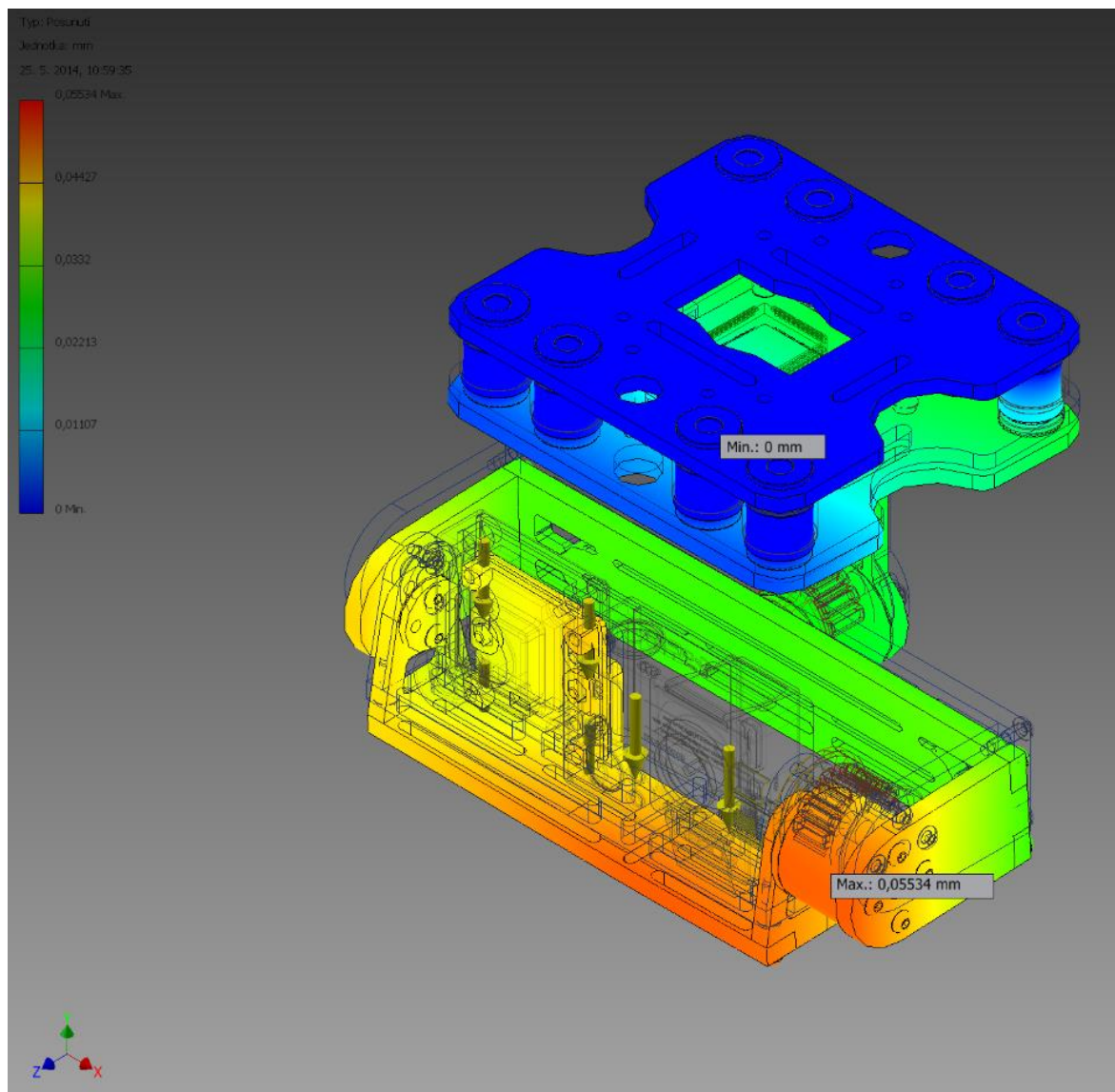
Výsledky:

Tabulka 6: Reakční síla a moment na vazbách (analýza FEA varianta 1).

Název vazby	Reakční síla		Reakční moment	
	Velikost	Komponenta (X,Y,Z)	Velikost	Komponenta (X,Y,Z)
Pevná vazba:1	6,93071 N	0 N	0,0749108 Nm	0,0749096 Nm
		6,93071 N		0 Nm
		0 N		0,000416345 Nm

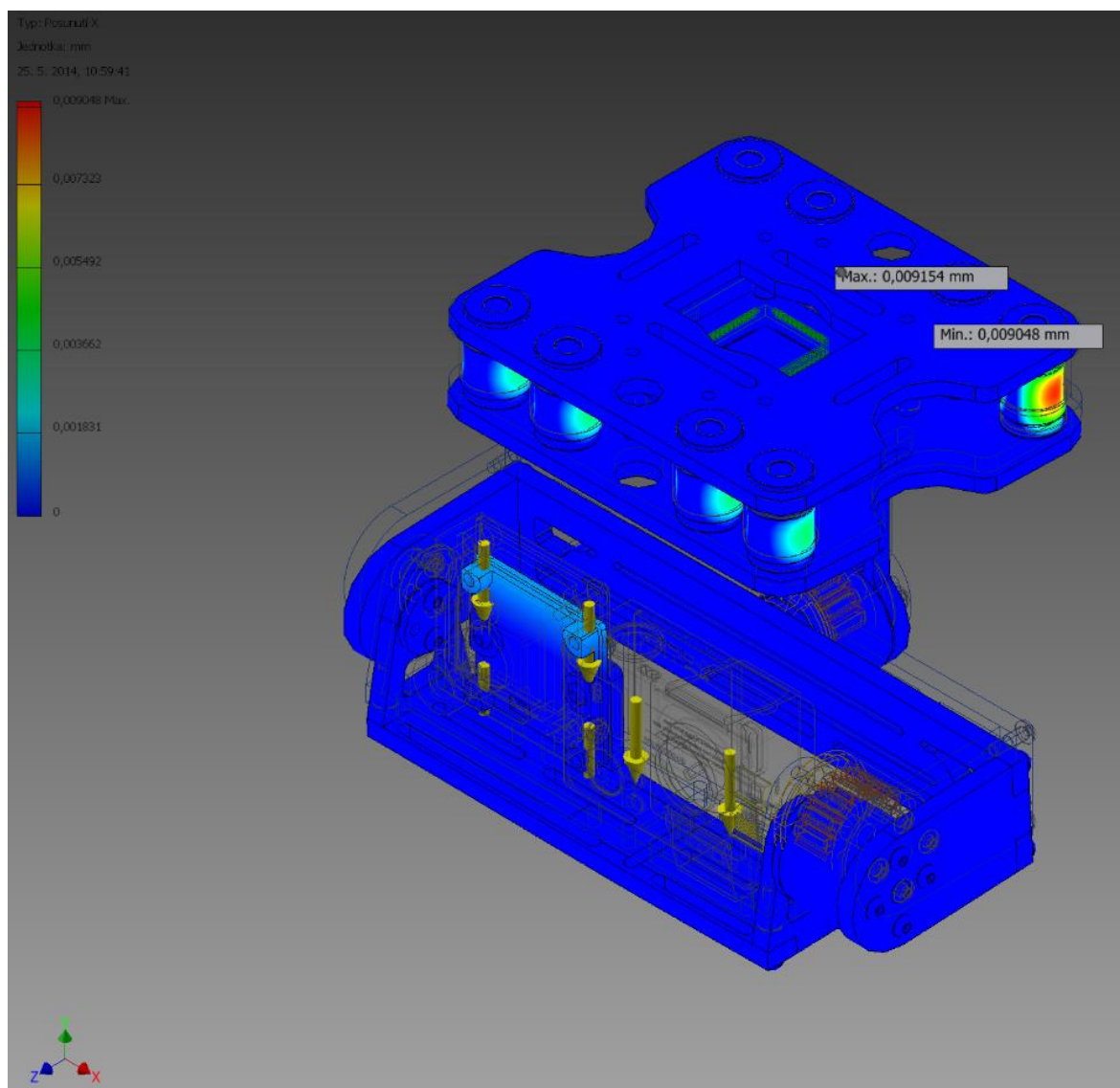
Tabulka 7: Souhrn výsledků (analýza FEA varianty 1).

Název	Minimální	Maximální
Objem	253104 mm <sup>3</sup>	
Hmotnost	0,541571 kg	
Napětí Von Mises	1,94208 x 10 <sup>-6</sup> MPa	249,411 MPa
První hlavní napětí	-120,234 MPa	259,139 MPa
Třetí hlavní napětí	-381,225 MPa	83,1535 MPa
Posunutí	0 mm	0,0553365 mm
Součinitel bezpečnosti	1,40331 ul	15 ul



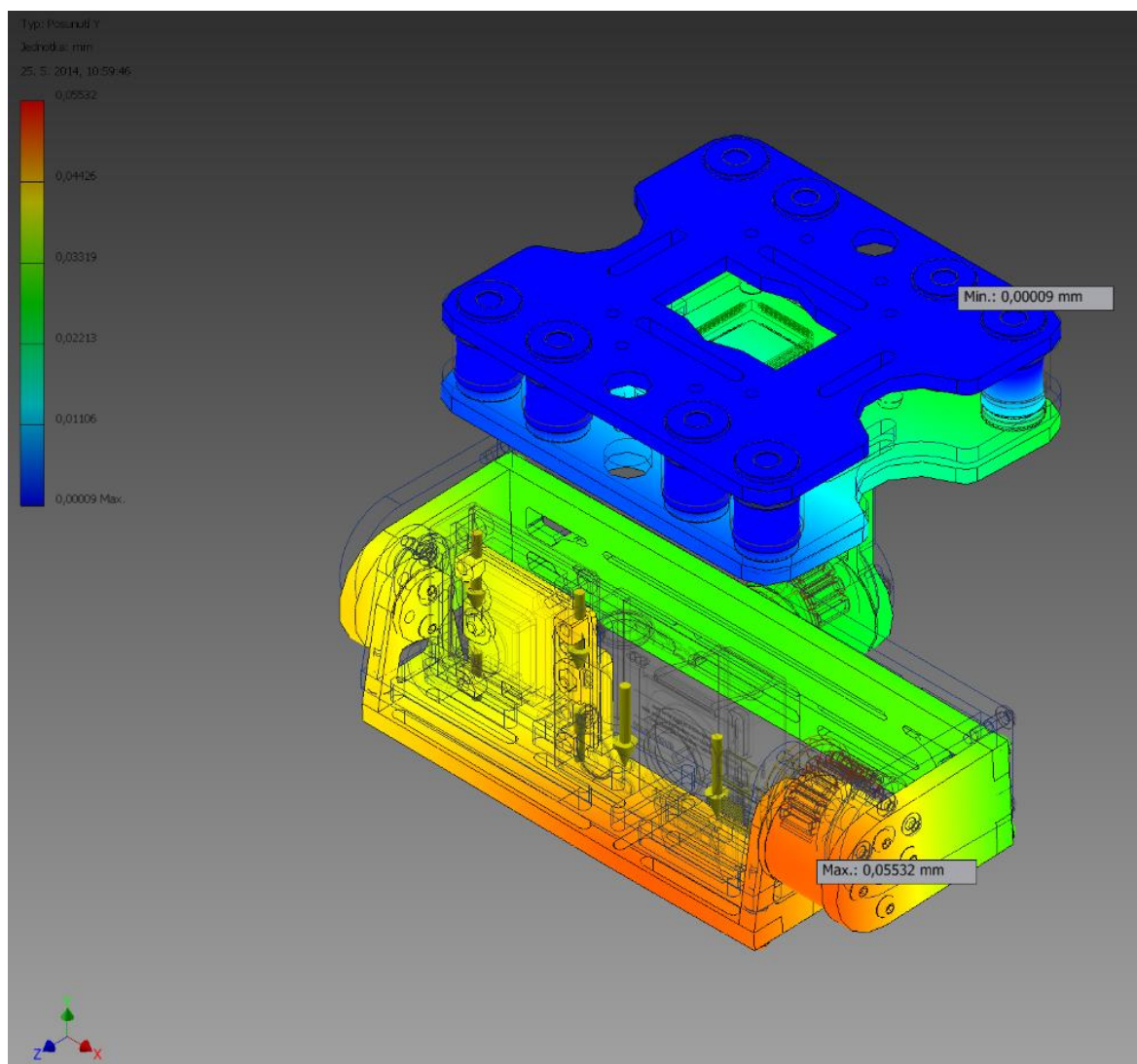
Obr. 47: Celkové posunutí komponent (analýza FEA varianta 1).

Z Obr. 47 je patrné, že celkové posunutí, nebo chceme-li deformace, bude největší v místě uložení kamer, jak bylo předpokládáno, protože tento konstrukční prvek bude nejvíce namáhán, v poměru k jeho rozměrům.



Obr. 48: Posunutí komponent v ose X (analýza FEA varianta 1).

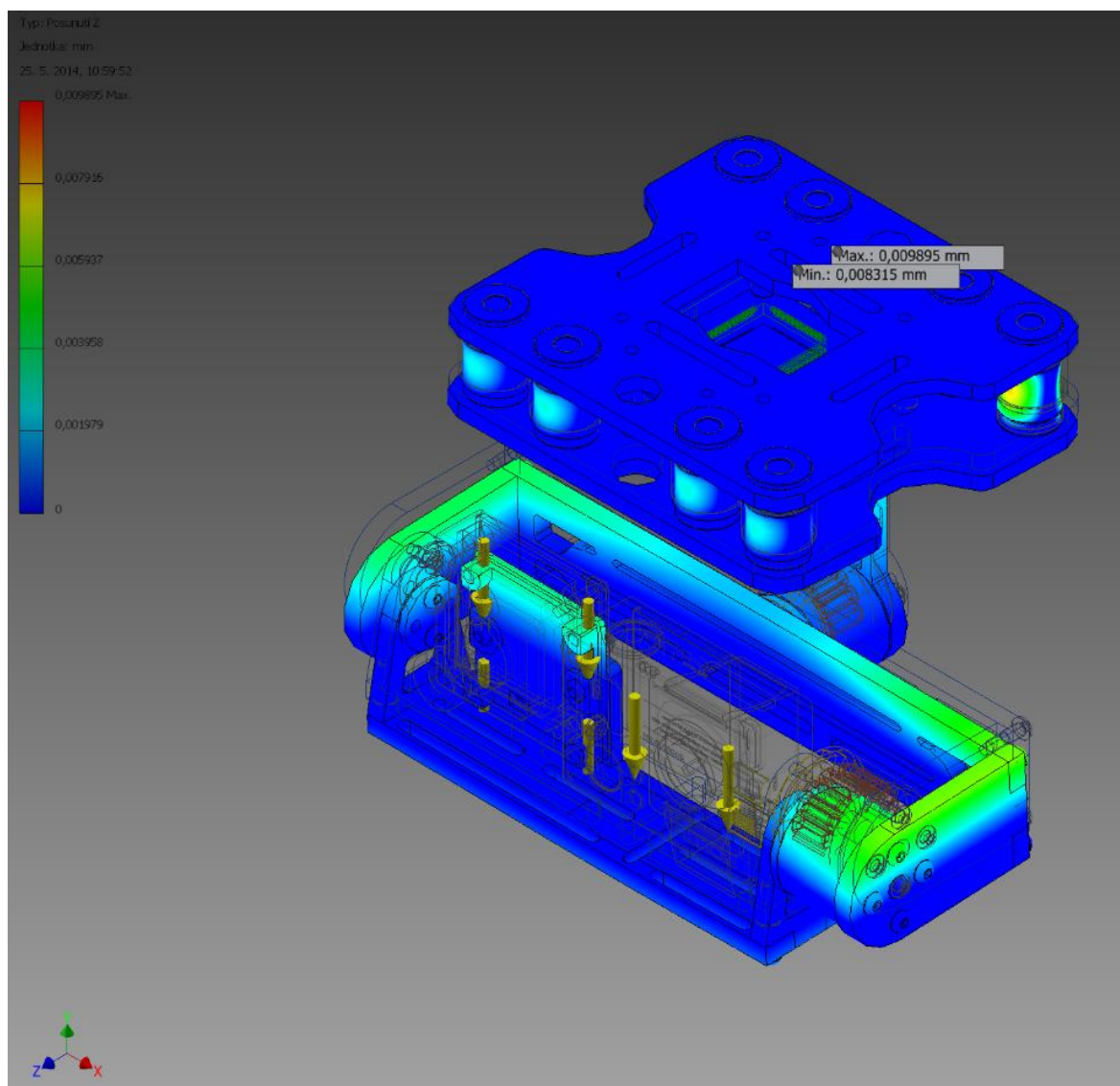
Na Obr. 48 je jasně patrný fakt, že těžiště prvků, připevněných na vertikálním rameni, je mírně posunutě směrem doprava (při čelním pohledu). Toto posunutí pak deformuje nejvíce pružné tlumicí elementy, hlavně tedy v jejich prostřední části, kde jsou nejměkčí. Tohoto jevu se lze vyvarovat posunutím celé spodní konzoly na drážkách směrem doleva (opět při čelním pohledu). Model byl účelně zarovnan na osu horizontální kolébky, zaprvé z důvodu, aby se daná deformace zobrazila v analýze, a zadruhé kvůli co největší souměrnosti modelu.



Obr. 49: Posunutí komponent v ose Y (analýza FEA varianta 1).

Na Obr. 49 je snímek, zobrazující deformaci mechanismu v ose Y. Je jasné, že v tomto směru (tedy ve směru působení gravitace), budou deformace největší. Opět je nejvíce namáháno okolí uložení snímací GoPro kamery, jedná se totiž o prvek s největší vlastní vahou, umístěný na konstrukci. Posunutí spodní základové desky na vzdálenější straně by bylo možné zamezit montáží vertikálního ramene blíže ke středu, nicméně toto řešení by sice příznivě ovlivnilo deformace na mechanismu, ale nepříznivě by se projevilo na těžišti hexakoptéry.

Na Obr. 50 je patrné posunutí v ose Z, které taktéž demonstruje polohu těžiště zavěšených komponent mimo osu základny.



Obr. 50: Posunutí komponent v ose Z (analýza FEA varianta 1).

#### Interpretace výsledků analýzy:

Z obrazových (viz Obr. 47, Obr. 48, Obr. 49 a Obr. 50) a číselných (viz Tabulka 6 a Tabulka 7) výsledků analýzy vyplývá, že konstrukční návrh je z pevnostního hlediska dimenzován dostatečně. Posunutí komponent se odehrává v řádech maximálně setin milimetru, pevnostně daný materiál vyhovuje a součinitel bezpečnosti je minimálně 1,4, což je vzhledem k hobby použití stabilizačního mechanismu naprosto dostatečné. Pokud bychom chtěli dosáhnout vyšší bezpečnosti, bylo by nutné komponenty vyrábět z tlustšího materiálu, což by ale mělo nepříznivý vliv na hmotnost. Vyšší hmotnost zařízení, zavěšených pod hexakoptérou, totiž snižuje délku jejího provozu – z baterií je nutné odčerpat více energie.



## 4.2 Varianta 2

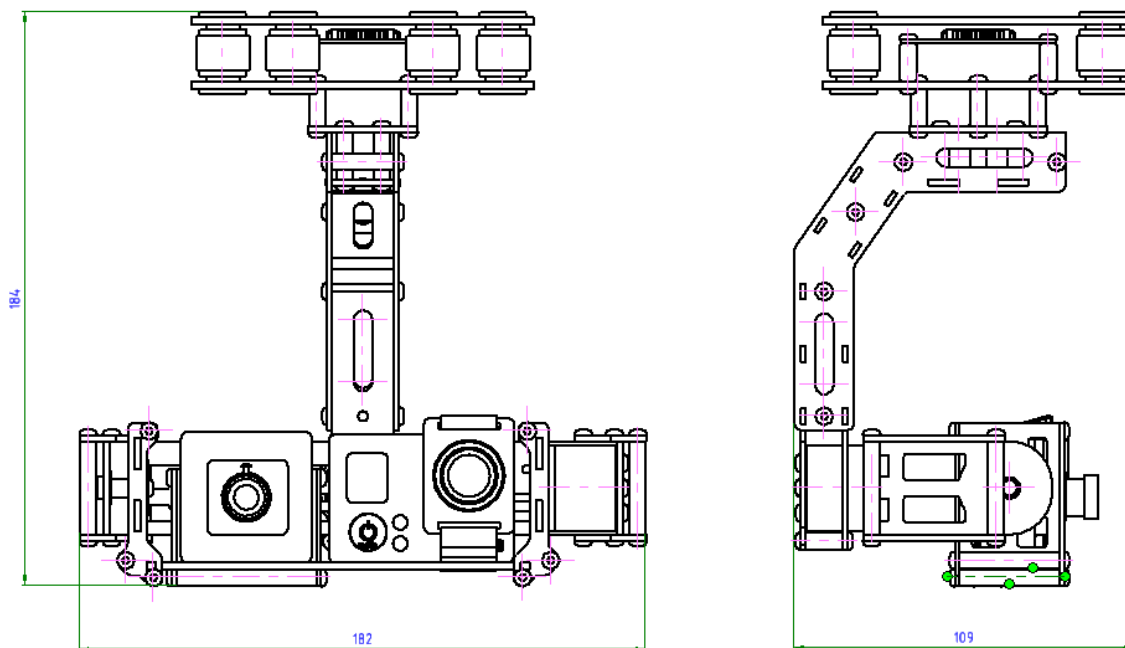


Obr. 51: Konečná verze - varianta 2.

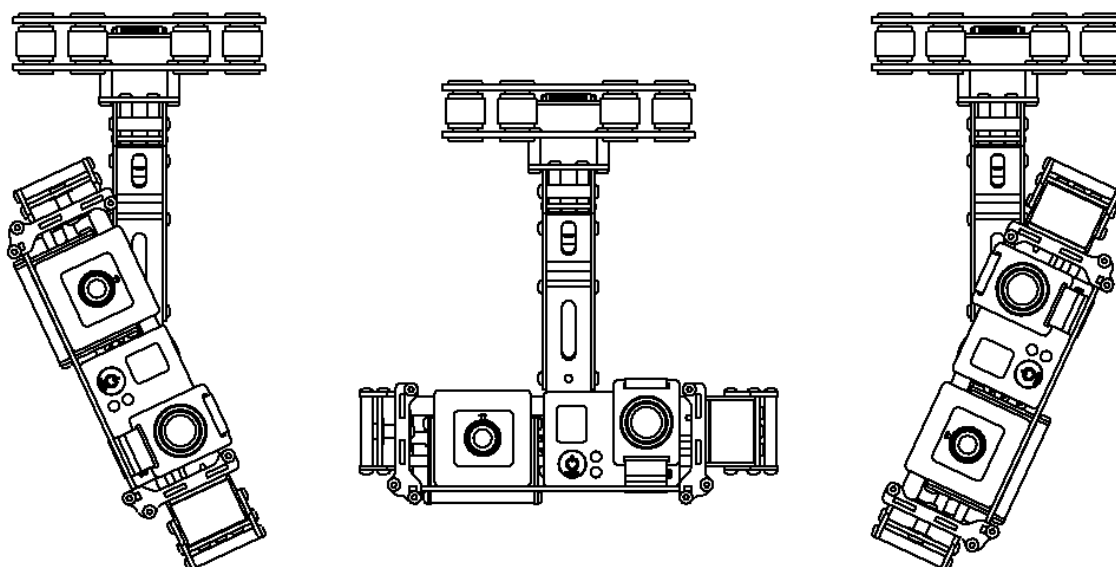
Vzhledem k hmotnosti a pouze obtížné možnosti v budoucnu upravit mechanismus varianty 1 na otáčivý kolem všech tří os bylo rozhodnuto zpracovat i druhý návrh (viz Obr. 51). Tento se liší především použitím jiných materiálů – jako s hlavním materiálem je počítáno s karbonem, nicméně v další části se zmiňují o možných levnějších náhradách - a koncepcí uzpůsobenou tak, aby šlo jednoduše, výměnou pouze několika málo komponent přetvořit mechanismus na otáčivý kolem všech tří os. Ve stávajícím stavu je sice mírně větší a složitější na montáž než předchůdce, je ale i přesto lehčí a umožňuje větší rozsah otáčení. Základní parametry viz Tabulka 8, základní rozměry a možnosti natočení viz Obr. 52, Obr. 53 a Obr. 54.

Tabulka 8: Základní parametry varianty 2.

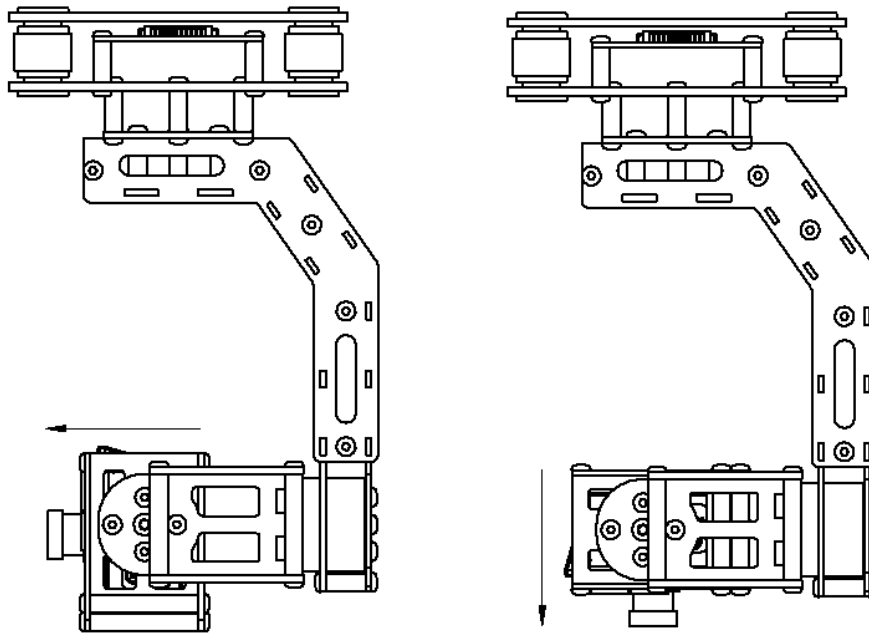
Parametr	Hodnota
Hmotnost s kamerami	532 g
Hmotnost bez kamer	369 g
Šířka	182 mm
Výška	184 mm
Hloubka	109 mm



Obr. 52: Základní rozměry varianty 2.

Obr. 53: Natočení kamer kolem horizontální osy vodorovné s osou letu ( $-65^\circ$ ;  $+65^\circ$ ).

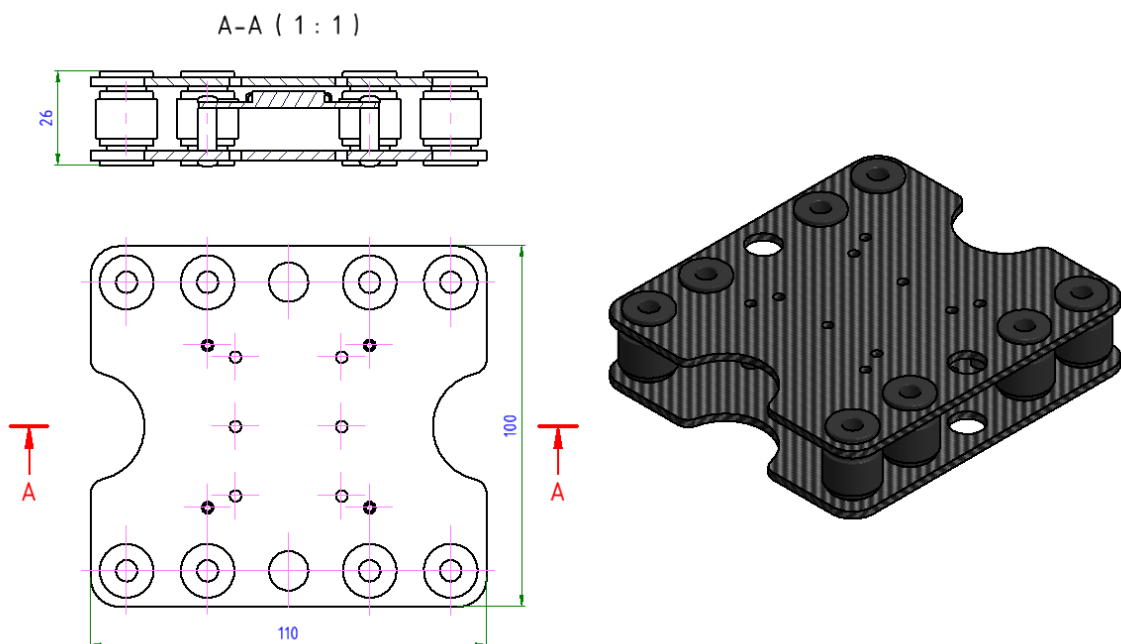




Obr. 54: Natočení kamer kolem horizontální osy kolmé k ose letu.

#### 4.2.1 Základní komponenty varianty 2

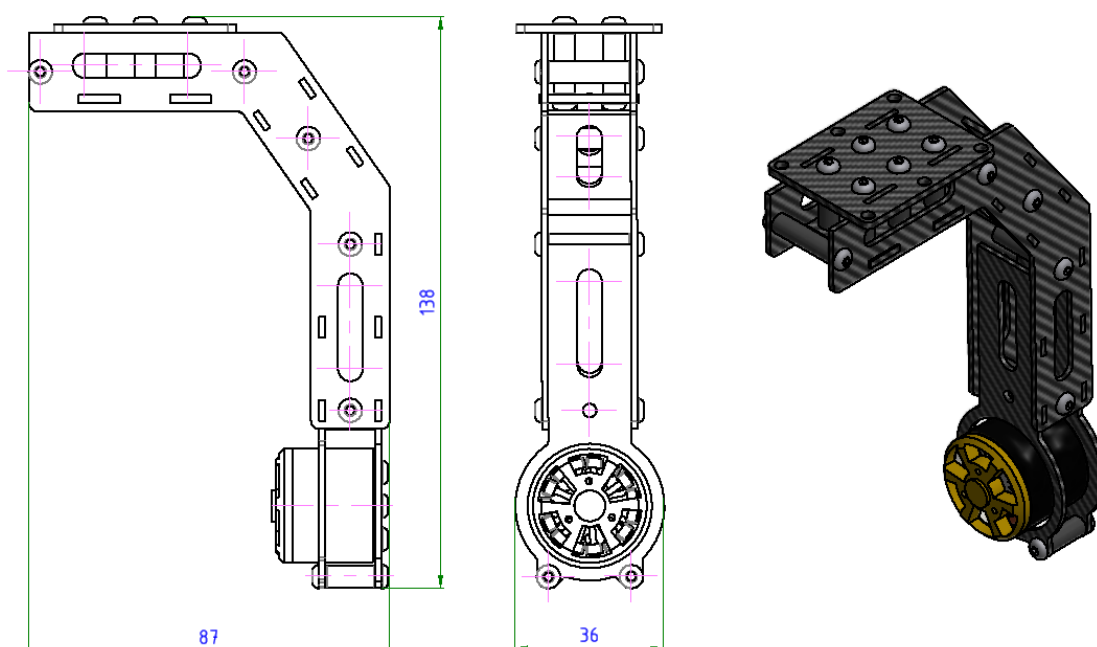
##### Základna



Obr. 55. Základna varianty 2.

Základna varianty 2 (viz Obr. 55) je koncepčně i vnějšími rozměry totožná se základnou z varianty 1. Díky použití jiných materiálů je ovšem o polovinu lehčí. Větší srovnání obou variant je uvedeno v další kapitole. Její desky jsou opět stejné, obě mají tloušťku 2,5mm a jsou spojené pružnými elementy pro eliminaci vibrací. Montážní otvory jsou umístěny tak, aby šlo k základně připevnit vertikální rameno nesoucí zbytek stabilizačního systému, řídicí jednotku i držáky pro uchycení k hexakoptéře. Základnu lze, stejně jako v případě první varianty, také osadit variabilním počtem tlumících elementů a řídicí jednotka je přišroubována přes plastové distanční válečky.

### Vertikální rameno

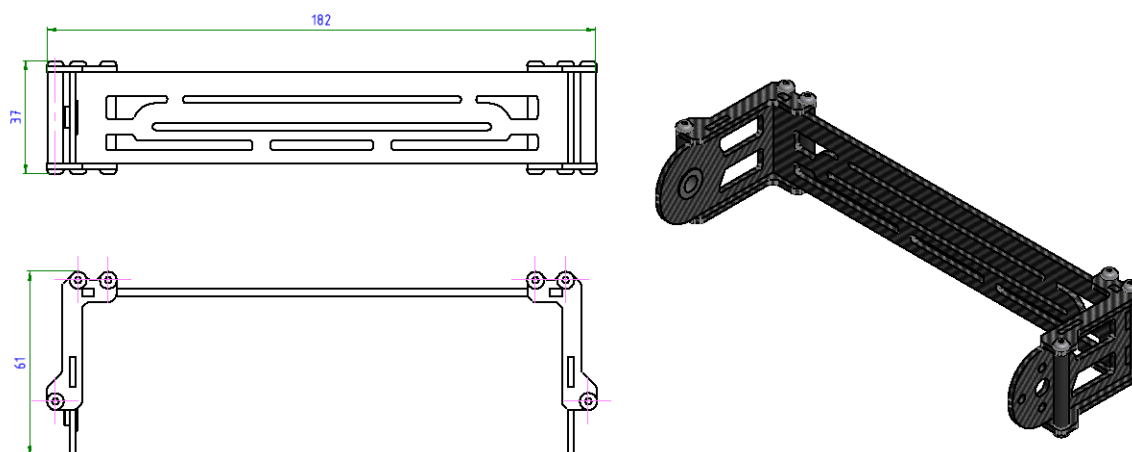


Obr. 56: Vertikální rameno varianty 2.

Vertikální rameno druhé varianty je podstatně složitější, než u varianty 1 (viz Obr. 56). Skládá se z mnoha do sebe zapadajících dílů (pomocí výřezů), které jsou k sobě sešroubovány pomocí dovnitř vložených plastových distančních válečků délky 20mm. K sešroubování pak slouží šrouby M3x6. Motor je uchycen letmo, ale zadní opěrná deska, ke které je uchycen, je vyztužena sešroubováním přes distanční válečky s přední deskou s výřezem na motor. Na horní ploše ramene je přišroubována (pomocí plastových distančních válečků délky 15mm) deska, sloužící k uchycení celého ramene k základně – opět přes distanční válečky, tentokrát délky 12mm. V případě, že by uživatel chtěl modifikovat tento stabilizační mechanismus na trojosý, stačí naposledy zmíněnou desku

vyměnit za desku s výřezy pro motor. Všechny díly ramene jsou vyrobeny z desek tloušťky 1,5mm, vyjma desky sloužící k uchycení k základně, která je tlustá 2mm. Koncepce tohoto ramene má různé výhody. Posunulo se těžiště celého mechanismu blíže k vertikální ose základny, rameno má větší šroubovatelnou plochu a více bodů uchycení, takže je minimalizováno riziko upadnutí a modifikovat pomocí něj stabilizační mechanismus na trojosý je po mechanické stránce velice jednoduché. Složitost ramene na seskládání je sice značná, nicméně i přes množství dílů je jeho celková hmotnost 112g i s motorem je velice příznivá, protože dohromady se základnou se jedná v součtu o tutéž hmotnost, jako je hmotnost samotné základny varianty 1, navíc s výše popsányi konstrukčními výhodami.

### Horizontální kolébka



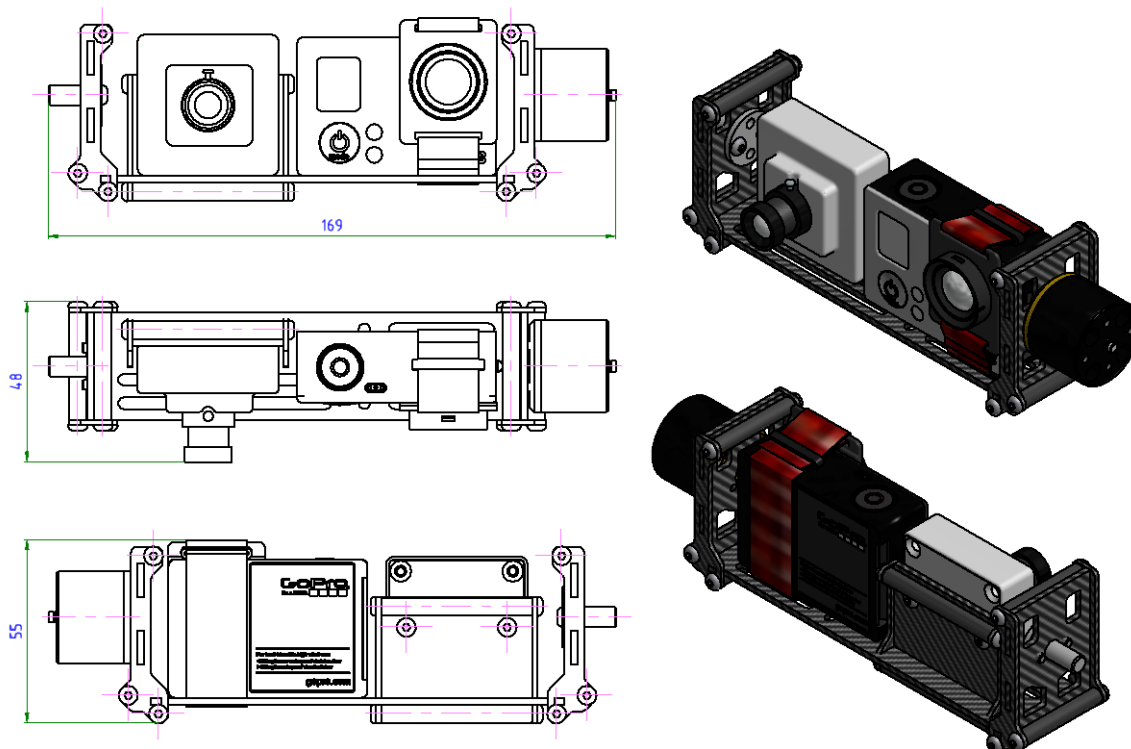
Obr. 57: Horizontální kolébka varianty 2.

Horizontální kolébka je vyobrazena na Obr. 57 a smontována z těchto základních dílů:

- Základní deska tloušťky 2,5mm, sloužící k upevnění kolébky k motoru na vertikálním rameni. Její drážky pro přišroubování jsou dostatečně dlouhé na to, aby šla kolébka usadit tak, že těžiště bude v ose motoru, čímž bude docházet k jeho výrazně nižšímu namáhání
- Dvě ramena z desky tloušťky 2mm, sloužících k uchycení horizontální kolébky. Jedno je uzpůsobeno pro montáž motoru vertikální kolébky, ve druhém je uchyceno kluzné pouzdro Iglidur.
- Čtyři vyztužná ramena z desky tloušťky 2mm sloužící k vyztužení ramen. Vzhledem k tomu, že použité materiály na základní desku a ramena jsou zaprvé velmi tenké a zadruhé jsou myšleny z kompozitního materiálu, bylo by jejich sešroubování dohromady pomocí šroubů v závitech velmi obtížné, ne-li nemožné. Z tohoto důvodu

jsou na všech dílech výstupky a výřezy, které do sebe vzájemně zapadají. Výztužná ramena se sestaví s ostatními díly a dvojice ramen na každé straně se k sobě sešroubují pomocí plastových distančních sloupků délky 30mm a šroubů M3x6. To zajistí jak možnost celou konstrukci vůbec smontovat, tak vyztužení ramen pro uchycení vertikální kolébky tak, aby nedošlo k jejich deformaci vlivem vysokého ohybového zatížení.

### Vertikální kolébka



Obr. 58: Vertikální kolébka varianty 2.

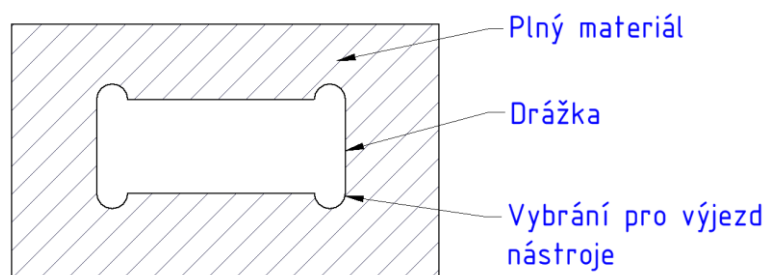
Princip konstrukce vertikální kolébky vychází z kolébky horizontální. Skládá se, stejně jako kolébka horizontální ze základní desky tloušťky 2mm, dvou ramen pro uchycení čepu a motoru taktéž z desky tloušťky 2mm a 4 výztužných ramen z desky tloušťky 1,5mm (viz Obr. 58). Výztužná ramena vzhledem k orientaci kolébky nejsou tolik zatížena, protože těžiště kolébky je blízko osy uchycení, ohybový moment tedy není zdaleka tak velký, jako u kolébky horizontální a bylo tedy možné zvolit menší tloušťku polotovaru. Vertikální kolébka má navíc opěrnou desku pro uchycení FPV CCD kamery. Tato deska je ke kolébce přichycena opět sestavou z opěrných ramen a plastových válečků a je kdykoliv možné ji demontovat (například pokud bude chtít uživatel použít jiné záznamové zařízení).

#### 4.2.2 Uvažovaný materiál a povrchová úprava

Za primární materiál k výrobě a dimenzování byl navržen kompozitní materiál s obsahem uhlíkových vláken, takzvaný karbon. Tento materiál lze s výhodou dělit vodním paprskem. Lze jej i obrábět konvenčními metodami na frézkách, nicméně v takovém případě je vhodné používat povlakované nástroje (například nástroje s diamantovým povlakem), které jsou relativně drahé. Karbon jako takový je velmi tvrdý, tudíž dochází k rychlému opotřebení nástrojů a je tedy nutné je častěji měnit. Navíc při frézování, soustružení a vrtání karbonu vzniká velké množství prachu, což navyšuje náklady na pořízení strojového vybavení pro výrobu. Karbon jako takový není nutné povrchově upravovat.

Při dělení karbonu vodním paprskem je třeba dbát na fakt, že průměr vodního paprsku je minimálně 0,7mm (dle mnou zjištěných informací). Je proto nutné podle toho tolerovat výřezy a výstupky na jednotlivých dílech tak, aby byly jednotlivé komponenty smontovatelné. Toto je třeba výkresově ošetřit.

V případě frézování materiálu je třeba brát v potaz fakt, že fréza je válcový nástroj, a tudíž nedokáže vyrobit ostré rohy (běžně používanými stroji). V tomto případě by bylo nutné upravit díly podle použitého nástroje tak, aby bylo dosaženo plné kompatibility a zapadnutí dílů vzájemně do sebe, jako je třeba uvedeno níže na Obr. 59.



Obr. 59: Příklad tvaru drážky pro frézování.

V rámci průzkumu trhu a vlastních zkušeností autora se stavbou modelů a průmyslových strojů bylo vybráno několik dalších variant materiálů, kterými by bylo možné relativně drahý karbon nahradit. Je ale v takovém případě nutné opět zvážit výrobní postup jednotlivých dílů.

Navrhované náhradní materiály:

1. Textit – tvrzená bavlněná tkanina (krezoformaldehydová živice jako pojivo a bavlněná tkanina jako výztuž). Vyrábí se lisováním za zvýšené teploty. Vyznačuje se vysokou elektrickou a mechanickou pevností, houževnatostí, dobrou opracovatelností, nízkou specifickou hmotností vůči porovnatelným materiálům a odolností vůči vodě, olejům, benzínům a proti slabým kyselinám. Dobré mechanické a kluzné vlastnosti. Tlumí nárazy. Lze jej opracovávat řezáním, frézováním vrtáním a soustružením, s výhodou jej lze dělit vodním paprskem.
2. Sklotextit – tvrzená skelná tkanina (epoxirezolová živice jako pojivo a skelná tkanina jako výztuž). Vyrábí se lisováním za zvýšené teploty. Mimo dobrých mechanických, elektroizolačních a fyzikálních vlastností má i vysokou klimatickou odolnost a minimální nasákavost. Opracování je shodné s textitem. Často využíván v modelářství.
3. ABS plast – terpolymer vznikající polymerizací styrenu a acrylonitrilu za přítomnosti polybutadienu. Materiál je houževnatý, tvrdý a odolný proti poškrábání. Není nasákvavý vodou a má dobrou rozměrovou stabilitu. Polotovary lze opracovávat stejně jako předchozí dva materiály, navíc jej lze tvarovat lisováním ve vstřikovacích lisech.

**4.2.3 Analýza FEA**Vstupní parametry analýzy FEA

Pevná vazba byla umístěna na horní základovou desku, zatížení vertikální kolíčky kamerami bylo nahrazeno plošným zatížením v místě styku. Dále bylo zahrnuto zatížení vlastní vahou. Vstupní parametry analýzy viz Tabulka 9.

Tabulka 9: Fyzikální vstupní parametry analýzy FEA varianty 2.

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Hmotnost	0,538483 kg
Plocha	238200 mm <sup>2</sup>
Objem	245269 mm <sup>3</sup>
Těžiště	x=9,49052 mm y=-96,0806 mm z=-3,45984 mm
Prům. velikost prvku (zlomek průměru modelu)	0,1
Min. velikost prvku (zlomek prům. velikosti)	0,2
Použit pro síť sestavy měření založená na součástech	Ano

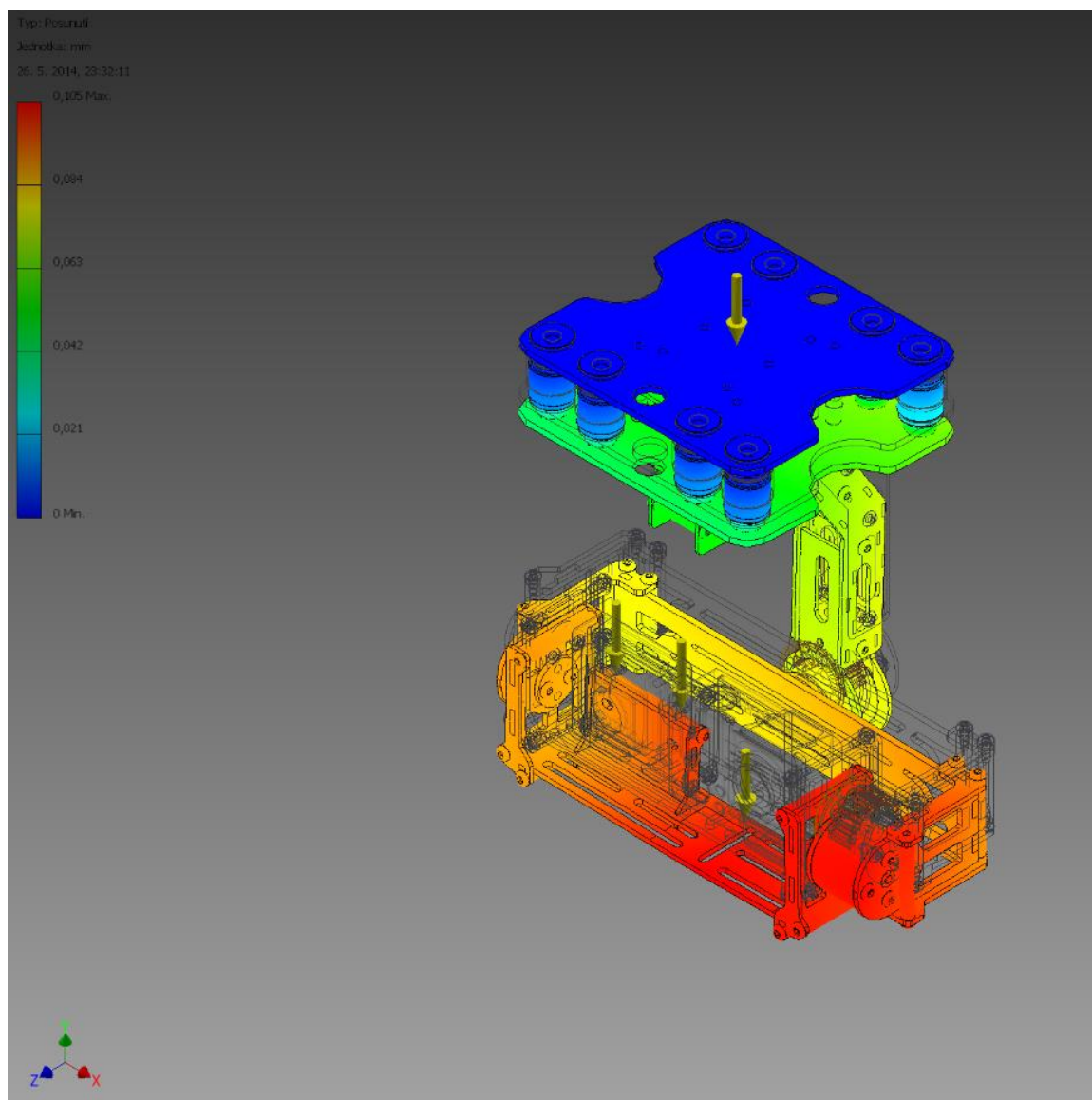
Výsledky:

Tabulka 10: Reakční síla a moment na vazbách (analýza FEA varianta 2).

Název vazby	Reakční síla		Reakční moment	
	Velikost	Komponenta (X,Y,Z)	Velikost	Komponenta (X,Y,Z)
Pevná vazba:1	5,34141 N	0,00833423 N	0,0232028 Nm	0,0231946 Nm
		5,34141 N		0 Nm
		0 N		0,000617142 Nm

Tabulka 11: Souhrn výsledků (analýza FEA varianty 2).

Název	Minimální	Maximální
Objem	245269 mm <sup>3</sup>	
Hmotnost	0,379886 kg	
Napětí Von Mises	6,03873 x 10 <sup>-8</sup> MPa	24,3584 MPa
První hlavní napětí	-9,52815 MPa	31,5708 MPa
Třetí hlavní napětí	-30,2833 MPa	8,64411 MPa
Posunutí	0 mm	0,104972 mm
Součinitel bezpečnosti	5,97101 ul	15 ul



Obr. 60: Celkové posunutí komponent (analýza FEA varianta 2).

#### Interpretace výsledků analýzy:

Z výsledků analýzy vyplývá, že i druhá varianta je z pevnostního hlediska dimenzována dostatečně. Posunutí komponent se odehrává v řádech maximálně desetin milimetru, pevnostně daný materiál vyhovuje a součinitel bezpečnosti je i přes použití tenčích materiálů vyšší, než v případě varianty 1, minimálně 5,97. Obrazové a číselné výstupy analýzy viz Tabulka 10, Tabulka 11 a Obr. 60.



### 4.3 Konstrukční nakupované komponenty

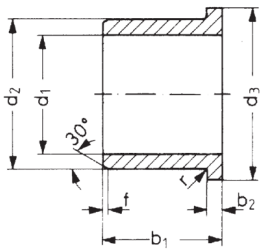
#### 4.3.1 Kluzné pouzdro Iglidur G GFM-0607-045

Toto kluzné pouzdro bylo použito z důvodu, že se autor s výrobky firmy Hennlich v praxi velmi často setkává, mnohokrát jsem jejich kluzná pouzdra při návrhu dílů použil a jejich poměr kvality k ceně je velmi dobrý. Kluzná pouzdra Iglidur G od výrobce Hennlich se vyznačují těmito vlastnostmi (převzato z internetového katalogu Hennlich):

- bezúdržbovost
- samomaznost
- pohlcují vibrace
- víceúčelové použití
- odolnost proti prachu a nečistotám
- k dispozici přes 900 rozměrů
- příznivá cena

Datový list materiálu Iglidur G je k nahlédnutí v příloze 1. Rozměry viz Tabulka 12.

Tabulka 12: Rozměry kluzného pouzdra Iglidur.

	Popis	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	b1 [mm]	b2 [mm]	Tvar
	GFM-0607-045	6	7	11	4,5	0,5	F

#### 4.3.2 Šrouby M3 s půlkulatou hlavou s vnitřním šestihranem

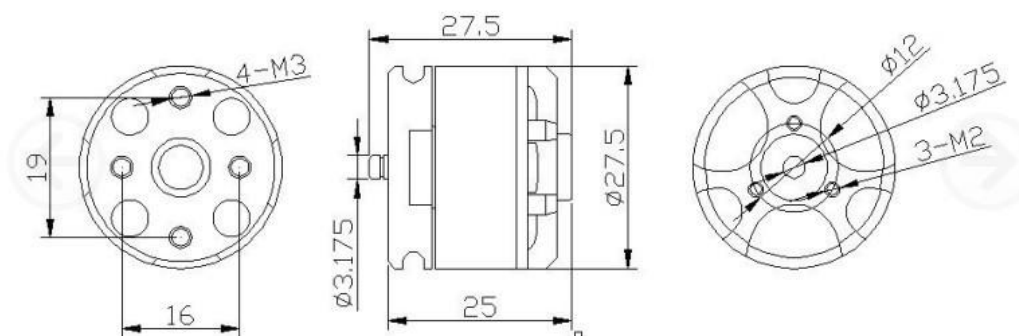
Pro smontování celého mechanismu byly použity šrouby s metrickým závitem M3 tří různých délek a to 6, 8 a 10mm. Šrouby mají půlkulatou hlavu a pro utahování a povolování jsou opatřeny vnitřní drážkou ve tvaru šestihranu. Ilustrační obrázek viz Obr. 61.



Obr. 61: Ilustrační obrázek šroubu s půlkulatou hlavou s vnitřním šestihranem [23].

### 4.3.3 Motory pohonu

Pro pohon stabilizačního zařízení byly v návrhu vybrány dva motory SunnySky GB-2208. Jejich základní parametry a rozměry viz Obr. 62 a Tabulka 13.



Obr. 62: Rozměrový náčrtek motoru SunnySky GB-2208 v provedení Outrunner [22].

Tabulka 13: Základní parametry motoru SunnySky GB-2208.



Model	SunnySky GB-2208
Hmotnost	37,5 g
Velikost statoru	22 x 8 mm
Průměr drátu	0,16 mm
Vnitřní odpor	0,144 Ohm
Počet otáček vinutí	80

## 5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A DALŠÍ SMĚŘOVÁNÍ PROJEKTU

Závěrečná kapitola slouží ke srovnání obou variant z hlediska užitku, navrhnutí výrobního postupu pro střední a velké série a plánovaný postup v realizaci projektu.

### 5.1 Porovnání základních parametrů obou variant

Tabulka 14: Porovnání navržených variant.

	 <b>Varianta 1</b>	 <b>Varianta 2</b>
<b>Parametr</b>		
Hmotnost [g]	695	532
Hmotnost bez kamer [g]	532	369
Výška [mm]	166	182
Šířka [mm]	120	184
Hloubka [mm]	112	109
Úhel natočení 1	± 50°	± 65°
Úhel natočení 2	360°	360°
Počet vyráběných dílů	14	67
Počet nakupovaných dílů (vyjma kamer)	11	11
Počet šroubů k sestavení	33	91
Možnost modifikace na 3osý systém	Ne	Ano
Minimální koeficient bezpečnosti	1,40	5,97

Z porovnávací tabulky (viz Tabulka 14) jednoznačně vyplývá, že varianta 1 bude snadněji smontovatelná. Vypadá jednodušeji, ovšem je těžší o více než 160g, což je relativně hodně. Každá zbytečná váha navíc, kterou hexakoptéra ponese, znamená kratší dolet a horší manévrovatelnost. Z tohoto důvodu se jeví lépe varianta 2. Stejně tak dovoluje větší záběr, je navržena s 3,5 násobně vyšším koeficientem bezpečnosti a v neposlední řadě vypadá subjektivně lépe. Nesmíme totiž zapomínat, že jedním z hledisek, při navrhování funkčních mechanismů pro prodej širokému spektru zákazníků, by měl být i estetický vjem.

## 5.2 Návrh výroby pro variantu 1

Zde jsou uvedeny navrhované typy výroby, který bylo, mimo jiné, snahou promítnout do konstrukčního návrhu stabilizačního zařízení. V potaz byly brány běžné zvyklosti středních a větších podniků, které autor vyzoroval z praxe.

### Vstupní parametry výroby

Počet vyráběných kusů v řádech tisíců až desetitisíců. Jedná se o plošné hliníkové díly, do některých je nutné z čelní strany vyvrtat otvor a vyrobit závit. Po opracování je třeba díly ještě povrchově upravit – eloxování.

### Polotovary

Jako polotovary byly navrženy hliníkové plechy požadovaných tloušťek z dřívě zmíněného materiálu EN AW-5754 H111. Lze je sehnat u většiny výrobců, zabývajících se dodávkou hutního materiálu. Pro určení rozměru polotovarů bude pravděpodobně hrát roli celkový počet kusů, který je potřeba vyrobit v jedné výrobní dávce a ceny u dodavatelů za různé rozměry.

### Výrobní operace

Jako dělicí operaci je navrženo dělení laserem. Počet úkonů by se totiž zmenšil na minimum. Do stroje se pouze založí plechový polotovar a stroj najednou může vypálit několik kompletních sad dílů bez nutnosti zásahu obsluhy. Oproti frézování má laser mnoho výhod. Při řezání se netvoří třísky, nemusíme řešit uchycení dílce a neopotřebujeme žádný rezný nástroj. Dále není nutné dílce sušit a oplachovat od chladicí emulze, kterou je potřeba při frézování použít.

Druhou operací, ale pouze u některých dílců, by bylo vrtání otvorů a výroba závitů. Pro tento účel je vhodná CNC fréza. Lze uvažovat i o přípravku, do kterého by se upnulo více stejných dílů, aby nemusela po každém vyvrtání otvoru probíhat výměna a upnutí dílu. Taktéž je výhodné zvolit stroj se zásobníkem nástrojů pro urychlení výroby.

Poslední operací je eloxování, zde je asi nejvýhodnější variantou zvolit dodavatelský způsob a elegantně se mu vyhnout. Jedná se totiž o chemicko-tepelný proces, tudíž je nutné splnit přísné hygienické normy, odvětrávání a mnoho dalších překážek pro realizaci. Pokud se výrobou zabývá strojírenská firma zaměřená na opracování materiálů na CNC strojích, bývá kooperace těchto operací zpravidla zvykem.

### 5.3 Návrh výroby pro variantu 2

#### Vstupní parametry výroby

Chceme vyrábět série v řádech tisíců až desetitisíců. Potřebujeme vyrobit dva druhy dílů, plošné karbonové, které není nutné po dosažení požadovaného tvaru jakkoliv dál opracovávat případně opatřovat povrchovou úpravou. Druhým typem dílů jsou plastové distanční válečky.

#### Polotovary

Pro plošné karbonové díly bude navrhovaným polotovarem karbonová deska požadované tloušťky.

Pro distanční válečky bude polotovarem plastová kruhová tyč z ABS plastu o průměru 5,2 mm v běžné dodavatelské délce (většinou 1000 mm nebo 3000 mm).

#### Výrobní operace

Plošné karbonové díly potřebují pouze jedinou výrobní operaci. Jak již bylo dříve zmíněno, obrábění karbonových materiálů je díky jejich fyzikálním vlastnostem (nasákavost, jemné částice, vysoká tvrdost) velmi obtížné. Karbonové materiály lze ale s výhodou řezat vodním paprskem. Použijeme tedy stejný princip, jako u varianty 1, tedy hromadnou výrobu několika sad v jednom cyklu stroje. Stačí vložit desku potřebné tloušťky do stroje, spustit program a vodní paprsek pak vyřeže požadovaný tvar. Po ukončení programu máme díly hotové, následuje pouze kontrola a případné začištění hran.

Distanční válečky vyžadují operace tři, ovšem všechny zvládnutelné v jednom stroji. Nekonečný profil podávaný do stroje z jedné strany vždy zajede do stroje o požadovanou délku, soustruh předvrtá otvor, vymění nástroj, vyřeže závit, vymění nástroj a upíchné hotový díl. Následuje posunutí polotovaru a takto se operace stále dokola opakují. Dávkování polotovarů do stroje lze také zajistit automaticky nějakým jednoúčelovým strojem.

#### **5.4 Další směřování projektu**

Odevzdáním diplomové práce projekt samozřejmě nekončí. Daný návrh bude realizován, nepůjde sice o rozjetí velkosériové výroby, ale minimálně o stavbu jednoho funkčního celku. Většinu času se práce zdržují z toho důvodu, že létání s MAV je pouze koníčkem, na které v dnešní době není mnoho času.

Momentálně se čeká na dodávku reklamované řídicí jednotky stabilizačního systému a motorů. Jakmile budou ověřeny jejich fyzické rozměry a případně upraveny modely, začne se s výrobou prvního prototypu. Pro výrobu byla zvolena varianta 2, protože je komplexnější. Je sice složitější na výrobu, ale to není tak limitující prvek.

Prototyp bude pravděpodobně vyroben z ABS plastu na fakultní 3D tiskárně. Po vyzkoušení, zda jde vše podle plánu složit a pasuje do sebe, je v plánu odladění softwaru stabilizačního mechanismu. Jakmile bude potvrzena mechanická funkčnost prototypu, bude třeba 3D modely převést v SW HSMWorks do podoby programu pro CNC obráběcí centrum. Podle dostupnosti materiálu a obráběcích nástrojů bude pravděpodobně zvolen buď karbon, nebo sklotextit, který je u RC modelářů velmi oblíbený.

Závěrečnou tečkou za projektem bude spuštění funkčního celku do provozu.

## ZÁVĚR

Již od 19. století se lidstvo pokoušelo, pomocí dostupných znalostí, o let s kolmým startem a přistáním. Rychlý vývoj v této oblasti následovala myšlenka bezpilotního létání. Několik dlouhých desetiletí byl vývoj bezpilotních strojů poháněn především díky vojenským požadavkům. Armádní bezpilotní letouny jsou dnes jedny z klíčových strategických výhod. Dokáží plnit velké množství různých úkolů (od raketových útoků po průzkumné noční lety se snímkováním povrchu). Díky velkému množství produkovaných strojů výrazně klesla jejich cena a použití UAV se v několika posledních desetiletích rapidním způsobem rozmáhá i v tržním a soukromém sektoru. V těchto oblastech plní nejčastěji funkce nosičů kamerových systémů, díky nimž pomáhají vyhledávat termovizi pohřešované osoby, policie je používá při průzkumu terénu, záchranné složky pro pátrání v nestabilních lokalitách, ulehčují vizuální kontroly vysokých budov a v neposlední řadě slouží k pořizování fotografických a videozáznamů, například z koncertů.

Z popisu UAV/MAV vyplývá, že hlavními požadavky na jejich stavbu jsou lehké materiály, výkonné motory, a co nejdélejší doba letu. Čím více hmotnosti stroj nese, tím kratší dobu vydrží ve vzduchu. Zároveň bylo zjištěno, že úroveň používané techniky je na relativně vysoké úrovni a snaží se využívat nejmodernějších poznatků. UAV jsou vyráběny z moderních materiálů, ať už se jedná o slitiny hliníku či titanu, plasty nebo kompozitní materiály různého složení. Spojovacím prvkem těchto materiálů jsou vysoká pevnost, odolnost proti teplotním šokům a schopnost tlumit vibrace. Jako zdroje napájení se používají nejmodernější na trhu dosažitelné baterie s technologií Li-Ion nebo Li-Pol, které poskytují velkou kapacitu, jsou velmi lehké a dovolují vysoké vybíjecí proudy.

Byly splněny cíle praktické části práce za přispění těchto parametrů varianty 2:

- pro výrobu byla zvolena lehčí konstrukce, která méně zatěžuje baterie hexakoptéry,
- byla zvolena lépe modifikovatelná konstrukce, která v případě budoucího upgradu na 3osý mechanismus ušetří finance za výrobu mnoha nových dílů,
- zvolený karbonový materiál dobře absorbuje vibrace (z tohoto důvodu se používá například při výrobě sportovního náčiní), čímž sám o sobě přispívá účelu stroje, stabilizaci obrazu,
- větší úhly natočení zvolené varianty dovolují širší snímaný záběr (důležitý parametr),
- vybraná varianta potřebuje k výrobě méně operací,
- navrhovaný karbonový materiál není nutné opatřovat povrchovou úpravou,
- zvolená varianta 2 má 3,5x vyšší minimální koeficient bezpečnosti než varianta 1.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Helicopter Fundamentals. Globalsecurity [online]. 2008 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/accp/al0966/le3>.
- [2] Helicopter designs before 1900: Amecourt [online]. 2013 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: [http://www.aviastar.org/helicopters\\_eng/amecourt\\_63.php](http://www.aviastar.org/helicopters_eng/amecourt_63.php)
- [3] Breguet-Richet Gyroplane No.1: Aviastar [online]. 2011 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: [http://www.aviastar.org/helicopters\\_eng/breguet\\_gyro.php](http://www.aviastar.org/helicopters_eng/breguet_gyro.php)
- [4] LEISHMAN, C.G. A History Of Helicopter Flight. [online]. 2000 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://terpconnect.umd.edu/~leishman/Aero/history.html>
- [5] U.S. Centennial Of Flight Commision: Helicopter Development in the Early Twentieth Century. [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: [http://www.centennialofflight.net/essay/Rotary/early\\_20th\\_century/HE2.htm](http://www.centennialofflight.net/essay/Rotary/early_20th_century/HE2.htm)
- [6] NOVA: Time Line Of UAVs. [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.pbs.org/wgbh/nova/spiesfly/uavs.html>
- [7] Leonardo Da Vinci Paintings, Inventions & Biography!: Leonardo Da Vinci Helicopter!. 2009 [online]. [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://www.leonardo-da-vinci-biography.com/leonardo-da-vinci-inventions.html>
- [8] The Anatomy Of Melancholy. [online]. 2011. vyd. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://theanatomyofmelancholy.tumblr.com/page/94>
- [9] Wikimedia Commons: File:De Bothezat Flying Octopus.jpg. [online]. 2013. vyd. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:De\\_Bothezat\\_Flying\\_Octopus.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:De_Bothezat_Flying_Octopus.jpg)
- [10] Wallmu: Ah 64 Apache Helicopter Pictures. [online]. 2012. vyd. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.wallmu.com/your-wallpapers/ah-64-apache-helicopter-pictures-63548.html>
- [11] Folkstone Airshow: Flying Displays. [online]. 2014. vyd. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://folkestoneairshow.com/saturday-7/>
- [12] BOEING. *Boeing UK* [online]. 2014. vyd. 2014-05-28 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.boeing.co.uk/>
- [13] Draganfly: A Short History of Unarmed Aerial Vehicles (UAVs). [online]. 2014. vyd. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.draganfly.com/news/2009/03/04/a-short-history-of-unmanned-aerial-vehicles-uavs/>



- [14] Rollingstone Politics: Killer Drones: How America Goes to War in Secret by Michael Hastings. [online]. 2012. vyd. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.rollingstone.com/politics/news/the-rise-of-the-killer-drones-how-america-goes-to-war-in-secret-20120416>
- [15] Cradle of Aviation Museum: Curtiss-Sperry Aerial Torpedo. [online]. 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: [http://www.cradleofaviation.org/history/permanent\\_exhibits/world\\_war\\_i/curtiss\\_sperry\\_aerial\\_torpedo.html](http://www.cradleofaviation.org/history/permanent_exhibits/world_war_i/curtiss_sperry_aerial_torpedo.html)
- [16] Bigpicture: Эволюция беспилотников. [online]. 2012 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://bigpicture.ru/?p=273925>
- [17] Fórum.válka: De Havilland D.H.82B Queen Bee. [online]. 2010 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://forum.valka.cz/viewtopic.php/t/71054>
- [18] Hill Air Force Base: OQ-2A AERIAL TARGET. [online]. 2007 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.hill.af.mil/library/factsheets/factsheet.asp?id=5672>
- [19] Clubhzper: Consolidated PB4Y-1 BuNo 32032. [online]. 2008 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: [http://www.clubhyper.com/reference/calvertncokejh\\_1.htm](http://www.clubhyper.com/reference/calvertncokejh_1.htm)
- [20] AUVSI. *Association for Unmanned Vehicle systems International* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.auvsi.org/home>
- [21] Avioners: UAV RQ-1 Predator Wallpaper 509. [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://avioners.net/2010/01/uav-rq-1-predator-wallpaper-509.html/>
- [22] Aliexpress. [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.aliexpress.com/item/Sunnysky-GB2208-Brushless-Motor-for-FPV-Gopro-Camera-Aerial-Photography/1316714299.html>
- [23] CMC-Versand: Modellbau. [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.cmc-versand.de/Asso/0308550-M3x6mm-Rundkopfschraube-Alu-blau-6-arnr-60-0308550.html>
- [24] Aerovironment: Black Widow. [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: [http://www.avinc.com/uas/adc/black\\_widow/](http://www.avinc.com/uas/adc/black_widow/)
- [25] *RCGroups* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.rcgroups.com/>
- [26] GadgetReview: Spinmaster's Air Hogs RC Elite Helix X4 Copter and AtmoSphere Review. [online]. 2013 [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: <http://www.gadgetreview.com/toys/spinmasters-air-hogs-rc-elite-helix-x4-copter-atmosphere-review>

- [27] Goodluckbuy: V3 Brushless Camera Mount Gimbal Control Panel Controller + Sensor Module Set for FPV. [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.goodluckbuy.com/v3-brushless-mount-control-panelsensor-module-kit.html>
- [28] Hooked on RC Airplanes. [online]. 2013 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.hooked-on-rc-airplanes.com/brushless-rc-motors.html>
- [29] JokerHobby: Turnigy 42-40-A 1050kv Brushless Outrunner. [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.jokerhobby.com/turnigy-42-40-a-1050kv-brushless-outrunner.htm>
- [30] HRUŠKA, František. *Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2011. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [31] Fpvlab: Honey Badger is Ready to Take Off!. In: [online]. 2013 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://fpvlab.com/forums/showthread.php?11777-Honey-Badger-is-ready-for-takeoff!>
- [32] Wicked Drones: DJI. [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://wickeddrones.com/category/dji/>
- [34] La'store. [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: [http://store.mysecuritycamera.net/xt\\_xinte\\_dji\\_phantom\\_brushless\\_gimbal\\_camera\\_mount-B00JFPPEMU.scam](http://store.mysecuritycamera.net/xt_xinte_dji_phantom_brushless_gimbal_camera_mount-B00JFPPEMU.scam)
- [35] Aerial Tech Hobbies: Legacy 3-Axis Handle Version DSLR Brushless Gimbal. [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.aerialtechhobbies.com/legacy-3-axis-handle-version-dslr-brushless-gimbal>
- [36] GoPro: HERO3 White Edition. [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://gopro.com/cameras/hd-hero3-white-edition>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1: Náčrt da Vinciho létacího stroje [7].	10
Obr. 2: Lomonosovův tandemový motor [4].	11
Obr. 3: Gyroplán No. 1 bratří Brequetů [2].	11
Obr. 4: Helikoptéra "Ellhammer"[8].	12
Obr. 5: Pateras-Pescarův stroj schopný samostatného letu [3].	12
Obr. 6 "Flying Octopus" [9].	13
Obr. 7: Hughes AH-64 Apache [10].	14
Obr. 8: Sikorsky SH -3 Sea King [11].	14
Obr. 9: Boeing CH-47 Chinook [12].	14
Obr. 10: Pearlyho horkovzdušný balón s výbušninami [6].	15
Obr. 11: Eddyho průzkumné kity [6].	16
Obr. 12: Sperry Aerial Torpedo [15].	16
Obr. 13: Kettering Bug [6].	17
Obr. 14: DH.82B Queen Bee [16].	17
Obr. 15: Letadlo společnosti Radioplane Company [18].	18
Obr. 16: Přibližná podoba německého stroje V-1 [6].	19
Obr. 17: Bombardér PB4Y-1 Liberator [19].	19
Obr. 18: UAV letoun RQ-1 Predator [21].	20
Obr. 19: Monokoptéra Black Widow [6].	21
Obr. 20: Trikoptéra [25].	22
Obr. 21: Quadkoptéra Helix X4 [26].	23
Obr. 22: Motor Turnigy Outrunner C4240 [29].	25
Obr. 23: Řídicí jednotka pro stabilizaci B-Gimbal [27].	26
Obr. 24: Ovládací rozhraní setu B-Gimbal [27].	27
Obr. 25: Konfigurační rozhraní setu B-Gimbal [27].	27
Obr. 26: Quadkoptéra s nepohyblivým držákem FPV kamery [31].	31
Obr. 27: Quadkoptéra s jednoosým naklápěcím systémem [32].	32
Obr. 28: Gimbal Steady Cam pro kameru GoPro Hero [33].	32
Obr. 29: Tříosé stabilizační zařízení s rukojeťmi [35].	33
Obr. 30: Kamera GoPro Hero 3 HD s a bez ochranného krytu [36].	35
Obr. 31: 3D model použité CCD kamery v plastovém ochranném krytu.	35
Obr. 32: Detail drážek ochranného krytu CCD kamery.	36
Obr. 33: Použitá hexakoptéra - pohled zepředu a shora.	37
Obr. 34: 3D pohled první verze stabilizačního mechanismu.	39
Obr. 35: Základní rozměry první verze.	40
Obr. 36: 3D pohled na druhou verzi.	41
Obr. 37: Základní rozměry druhé verze.	41
Obr. 38: Detail uchycení čepu.	42
Obr. 39: Pohled na přibližný řezný plán dílů pro první a druhou verzi stabilizačního mechanismu.	43
Obr. 40: Konečná verze - varianta 1.	44
Obr. 41: Základní rozměry varianty 1.	45
Obr. 42: Natočení kamer kolem horizontální osy vodorovné s osou letu (-50°; +50°).	45
Obr. 43: Natočení kamer kolem horizontální osy kolmé k ose letu (360°).	46
Obr. 44: Základna varianty 1.	46

Obr. 45: Horizontální kolébka varianty 1.	47
Obr. 46: Vertikální kolébka varianty 1.	48
Obr. 47: Celkové posunutí komponent (analýza FEA varianta 1).	51
Obr. 48: Posunutí komponent v ose X (analýza FEA varianta 1).	52
Obr. 49: Posunutí komponent v ose Y (analýza FEA varianta 1).	53
Obr. 50: Posunutí komponent v ose Z (analýza FEA varianta 1).	54
Obr. 51: Konečná verze - varianta 2.	55
Obr. 52: Základní rozměry varianty 2.	56
Obr. 53: Natočení kamer kolem horizontální osy vodorovné s osou letu (-65°; +65°C).	56
Obr. 54: Natočení kamer kolem horizontální osy kolmé k ose letu.	57
Obr. 55: Základna varianty 2.	57
Obr. 56: Vertikální rameno varianty 2.	58
Obr. 57: Horizontální kolébka varianty 2.	59
Obr. 58: Vertikální kolébka varianty 2.	60
Obr. 59: Příklad tvaru drážky pro frézování.	61
Obr. 60: Celkové posunutí komponent (analýza FEA varianta 2).	64
Obr. 61: Ilustrační obrázek šroubu s půlkulatou hlavou s vnitřním šestihranem [23].	65
Obr. 62: Rozměrový náčrtek motoru SunnySky GB-2208 v provedení Outrunner [22].	66

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Parametry kamery GoPro Hero 3 HD.....	34
Tabulka 2: Parametry FPV CCD kamery. ....	36
Tabulka 3: Základní parametry hexakoptéry. ....	38
Tabulka 4: Základní parametry varianty 1.....	45
Tabulka 5: Fyzikální vstupní parametry analýzy FEA varianty 1. ....	49
Tabulka 6: Reakční síla a moment na vazbách (analýza FEA varianty 1). ....	50
Tabulka 7: Souhrn výsledků (analýza FEA varianty 1).....	50
Tabulka 8: Základní parametry varianty 2.....	55
Tabulka 9: Fyzikální vstupní parametry analýzy FEA varianty 2. ....	62
Tabulka 10: Reakční síla a moment na vazbách (analýza FEA varianty 2). ....	63
Tabulka 11: Souhrn výsledků (analýza FEA varianty 2).....	63
Tabulka 12: Rozměry kluzného pouzdra Iglidur. ....	65
Tabulka 13: Základní parametry motoru SunnySky GB-2208.....	66
Tabulka 14: Porovnání navržených variant.....	67

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>CCD</b>	[-]	Charged-Coupled Device
<b>CMOS</b>	[-]	Complementary Metal-Oxide Conductor
<b>FEA</b>	[-]	Finite Element Analysis
<b>FPS</b>	[-]	Frames Per Second
<b>FPV</b>	[-]	First Person View
<b>GPS</b>	[-]	Global Positioning System
<b>Li-Ion</b>	[-]	Lithium-Ion
<b>Li-Pol</b>	[-]	Lithium-Polymer
<b>MAV</b>	[-]	Micro Aerial Vehicle
<b>NTSC</b>	[-]	National Television System Committee
<b>PAL</b>	[-]	Phase Alternating Line
<b>RC</b>	[-]	Radio Controlled
<b>UAV</b>	[-]	Unmanned Aerial Vehicle

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	DATOVÝ LIST MATERIÁLU IGLIDUR G
Příloha 2	TECHNICKÝ LIST MATERIÁLU EN AW-5754-H111
Příloha 3	3D MODEL ZPRACOVANÉ VARIANTY 1 VE FORMÁTU STEP (POUZE V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ)
Příloha 4	3D MODEL ZPRACOVANÉ VARIANTY 2 VE FORMÁTU STEP (POUZE V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ)

# PŘÍLOHA 1 – DATOVÝ LIST MATERIÁLU IGLIDUR G



## Datový list materiálu



### Materiál: iglidur® G

#### Základní vlastnosti:

hustota:	1.37 g/cm <sup>3</sup>
barva:	černá
max. absorpce vlhkosti při 23°C / 50% r. v.:	1.4 % hmotnosti
max. absorpce vlhkosti:	5.6 % hmotnosti

#### Mechanické vlastnosti:

modul pružnosti:	7800 MPa
mez pevnosti v tahu při 20 °C:	240 MPa
tvrdost dle Shoreho:	79

#### Fyzikální a tepelné vlastnosti:

max. dlouhodobě působící teplota:	120 °C
max. krátkodobě působící teplota:	180 °C
minimální teplota:	-40 °C

#### Elektrické vlastnosti:

specifická hodnota odporu:	>10 <sup>11</sup> Ωcm
povrchový odpor:	>10 <sup>11</sup> Ω

Informace obsažené v tomto „Datovém listu materiálu“ jsou založeny na našich současných znalostech tohoto materiálu. Při kombinaci více vlastností materiál neposkytuje záruku na jednotlivé vlastnosti.

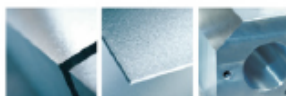
Hennlich Industrietechnik, spol. s r. o., Českolipská 9, 412 01 Litoměřice  
tel.: 416 711 338 fax: 416 711 999 [www.hennlich.cz/pouzdra](http://www.hennlich.cz/pouzdra)

[lin-tech@hennlich.cz](mailto:lin-tech@hennlich.cz)





# PŘÍLOHA 2 – TECHNICKÝ LIST MATERIÁLU EN AW-5754-H111



Válcované desky EN AW

EN AW 5754

TECHNICKÝ LIST

## EN AW 5754

Znaky slitiny	
Slitina	EN AW 5754 [AlMg3]
Typ slitiny	nevytvrditelná, přirozeně tvrdá
Povrch	H111
Stav materiálu	válcovaný povrch

Mechanické vlastnosti <sup>2)</sup>		typické hodnoty
Mez kluzu $R_{0,2}$	[MPa]	80
Pevnost v tahu $R_m$	[MPa]	190 - 240
Tažnost $A_{50}$	[%]	12
Tvrdość HBW	[2,5/62,5]	50

Fyzikální vlastnosti <sup>2)</sup>		typické hodnoty
Objemová hmotnost	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,67
Modul pružnosti	[GPa]	~ 70
Elektrická vodivost	[m/Ω · mm <sup>2</sup> ]	20 - 23
Koeficient tepelné roztažnosti	[K <sup>-1</sup> · 10 <sup>-6</sup> ]	23,9
Tepelná vodivost	[W/m · K]	140 - 160
Specifická tepelná kapacita	[J/kg · K]	900

Technologické vlastnosti <sup>2)</sup>		typické hodnoty
Tvarová stálost/Vnitřní prnutí		3 - 4
Obrobitelnost		4
Vhodnost k erozivnímu obrábění		1
Svařitelnost (plyn / WIG / MIG / Odporové / EB)		2 / 1 / 1 / 3 / 1
Odolnost proti korozi (mořská voda / povětrí / SpRK)		1 / 1 / 3
Použití při vysokých teplotách (max. °C při dlouhodobém/krátkodobém zatížení) <sup>3)</sup>		120 / 180
Eloxování (technické / dekorativní / tvrdé-) <sup>4)</sup>		1 / 2 / 1
Lešitelnost		1 - 2
Vhodnost k leptání struktur		4 - 5
Kontakt s potravinami (podle EN 602)		ano

Tolerance			
Při tloušťce [mm]	Rovinnost [mm] <sup>5)</sup>	Tloušťka [mm]	Delka & Šírka [mm]
3 - 50	EN 485-3	EN 485-3	EN 485-3
Zuschnitte			DIN ISO 2768-1m

Dodávané formáty		
Formáty [mm]	1.520 x 3.020	u tlouštěk od 3 - 50 mm
Tloušťky na skladě	3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12	
	15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 40 ; 50	
Další tloušťky podle poptávky!		

Datum: 12.07.2013

- 1) Typické hodnoty při pokojové teplotě.
- 2) Relativní hodnoty hliníkových materiálů od 1 (velmi dobrý) do 6 (nevhodný).
- 3) Bez strážné pevnosti po ochlazení.
- 4) Vylučně technická anodizace. Neposkytujeme žádnou struku na barevný vzhled/řezání.
- 5) Tolerance rovinnosti se měří vylučně na měřících stolech a s použitím ocelového pravítka.