

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a konstrukce prototypu víceúčelového dronu

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá výrobou prototypu víceúčelového dronu, včetně 3D návrhu rámu v CAD nástroji. Celý projekt zahrnoval základní rozvržení multikoptéry, vytvoření rámu na 3D tiskárně, vhodný výběr komponent, až po konečné sestavení. Funkčnost dronu byla ověřena zkušebním letem

Klíčová slova

Akumulátor, dron, filament, GPS, hmotnost, kamera, motor, multikoptéra, přijímač, rám, regulace, stabilizace, vrtule, vysílač, vztlak, 3D tiskárna.

Abstract

This thesis deals with production of a prototype of multipurpose drone including 3D design of frame in CAD application. The whole project included a basic layout of the multicopter the creation of a frame on a 3D printer a suitable selection of components and the final assembly. The dron functionality was verified by a test flight.

Key words

Battery, camera, drone, filament, frame, GPS, mass, motor, multicopter, propeller, pull, receiver, regulation, stabilization, transmitter, 3D printer.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 3.5.2018

Václav Pech

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Doc. Ing. Vladimíru Kindlovi Ph.D za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval firmě Správa informačních technologií města Plzně a její společnosti Drony za zapůjčení 3D tiskárny a hlavně jejich zaměstnanci Matouši Bolkovi za odborné rady, zapůjčení některých komponent a pomoc při tisku rámu.

Obsah

OBSAH	6
1 ÚVOD	8
2 HISTORIE A ROZDĚLENÍ DRONŮ	9
2.1 HISTORIE.....	9
2.2 LEGISLATIVA A PROVOZ DRONŮ.....	10
3 JEDNOTLIVÉ SOUČÁSTI DRONU	12
3.1 RÁM DRONU A PODVOZEK (FRAME KIT).....	13
3.2 MOTORY.....	14
3.3 ESC REGULÁTOR.....	16
3.4 VRTULE.....	17
3.5 LETOVÝ KONTROLÉR (FC).....	18
3.6 RÁDIO OVLÁDÁNÍ.....	20
3.6.1 PWM.....	21
3.7 GPS.....	22
3.8 FPV A PŘENOS VIDEO OBRAZU.....	23
3.9 DRŽÁK KAMERY (GIMBAL).....	24
3.10 AKUMULÁTORY.....	25
3.10.1 Pravidla pro zacházení s Li-Pol akumulátorem.....	26
4 VLASTNÍ NÁVRH A STAVBA DRONU	27
4.1 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH DRONU.....	28
4.2 VÝPOČET MTOM A DOBY LETU.....	29
4.2.1 MTOM.....	29
4.3 TEST BLDC MOTORŮ, ESC A VÝBĚR NEJVHODNĚJŠÍCH.....	30
4.3.1 Jednotlivé druhy motorů, vrtulí a jejich parametry.....	31
4.3.2 Průběh testu.....	32
4.3.3 Výsledky testu a konečný výběr motoru.....	33
4.3.4 Doba letu a vhodný výběr akumulátoru.....	35
4.4 KONSTRUKCE DRONU V PROGRAMU SOLIDWORKS.....	36
4.4.1 Vytvoření 3D modelu rámu.....	37
4.4.2 Konečný 3D tisk jednotlivých součástí.....	39
4.5 ROZVOD PALUBNÍHO NAPĚTÍ, VČETNĚ POZIČNÍHO OSVĚTLENÍ.....	40
4.6 VHODNÝ VÝBĚR GIMBALU A JEHO TESTOVÁNÍ.....	42
4.6.1 Nastavení gimbalu a PID regulace.....	43
4.7 FPV VIDEOPŘENOS.....	44
4.8 KONEČNÁ KOMPLETACE DRONU.....	44
4.9 ZÁVĚR.....	50
5 CITACE	51
6 PŘÍLOHY	52

Seznam symbolů a zkratek

ABS	akrylonitrilbutadienstyren
AMSL	above mean sea level
ATZ	aerodrome traffic zone
ATTI	attitude
AWG	american wire gauge
BEC	battery eliminating circuit
BLDC	brushless DC motor
CW	clockwise
CCW	counter clockwise
ESC	electric speed controller
FC	flight control
FPV	first person view
GLONASS	globalnaja navigacionnaja sputnikovaja systéma
GPS	global positioning system
IMU	inertial measurement unit
IOC	intelligent orientation control
MTOM	maximum takeoff mass
OSD	on screen display
PLA	polylactic acid
PWM	pulse width modulation
RC	radio control
RPM	revolutions per minute
UAV	unmanned aerial vehicles

1 Úvod

Bezpilotní letecké prostředky, které jsou běžně označovány termínem „Dron“, jsou v dnešní době již zcela běžným technickým systémem, který je používán v celé řadě odvětví. Ještě stále je však hlavním uplatněním těchto systémů v první řadě armádní průmysl, který také začal s jejich smysluplnou konstrukcí a vývojem. Dnes je díky velkému uvolnění některých technologií pro komerční sféru možné pořídit bezpilotní letoun a různé příslušenství, téměř bez jakýchkoliv problémů. Tento aspekt s sebou nese velké možnosti ve využití bezpilotních letounů také v komerčním prostředí, zejména k různému mapování krajiny a výškovým kontrolám všeho druhu. Zde je důležité zmínit i velký pokrok v minimalizaci a rozvoji kvalitních záznamových zařízení, které jsou na bezpilotním letounu instalovány bez značných nároků na váhu. Současně se výroba komerčních dronů přesouvá do Číny a díky značně příznivé ceně je možné rozmanité drony (počet vrtulí, velikost, váha, určení) nabídnout laické veřejnosti pro hobby použití. Dle zdroje Business Insider se předpokládá, že v následujících deseti letech dosáhne trh komerčních dronů 4 miliard amerických dolarů. [1] Jak již bylo uvedeno výše, bezpilotní letecký prostředek (UAV – unmanned aerial vehicles) je velmi často označován termínem „dron“, nicméně je potřeba toto uvést na pravou míru. Dron je označení víceméně slangové a mezi odborníky je využíváno minimálně. My se ho však pro přehlednost budeme držet a využívat jej. Zejména, když je veřejnosti obecně znám, běžně používán při komunikaci na internetových fórech a je i v zadání diplomové práce. Samotné slovo „dron“ vzniklo z anglického „Drone“ a má několik významů, jako například trubec, nebo vrčivý zvuk. Pozoruhodné je, že americká armáda velmi často využívá termíny z živočišné říše (V22 – Osprey, A10 – Warthog, G 2A – Greyhound, F-117 – Nighthawk, atd.).

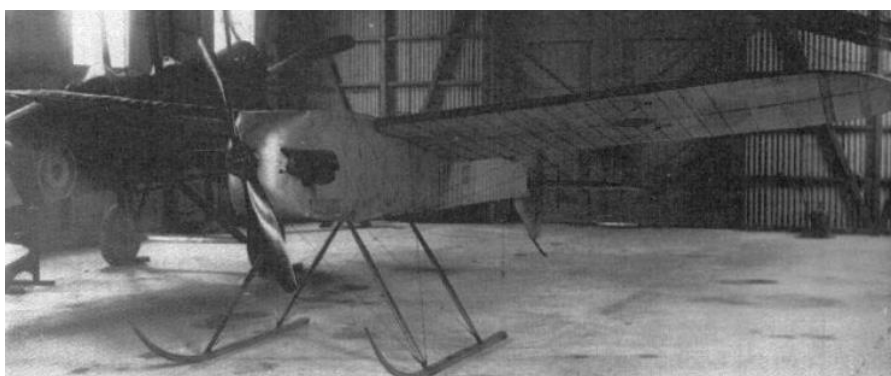
Na rozšíření dronů mezi obecnou veřejnost má značný podíl také technologie 3D tisku, která se vyvíjí zatím celkem krátce (cca od roku 1986), ale nyní zažívá skutečný rozmach. 3D tisk již dosahuje uspokojivých výsledků a lze ho ve spoustě činností bez problémů využít. Druhou možností, jak vyrobit rám dronu (frame kit), je použití technologie lití do formy, která není tak běžná a případné změny v konstrukci se hůře realizují.

Pro domácí výrobu dronu je dnes velkým pomocníkem také celá řada, zejména zahraničních, internetových obchodů, kde lze jednotlivé komponenty pořídit za celkem příznivé ceny, samozřejmě v dolarech. Na českém trhu se několik obchodů také najde, ale většinou jsou zde ceny přemrštěné. Každopádně výroba dronu svépomocí je celkem náročný proces a je potřeba dodržovat jistá pravidla (bude shrnuto níže) a být obeznámen s celou řadou aspektů, které výsledný výrobek přímo ovlivňují. Spoustu komponent lze jistě vyrobit svépomocí (ESC, regulátor napětí UBEC atd.), ale vzhledem k ceně několika málo dolarů se tento krok vůbec nevyplatí a je zcela jistě lepší daný komponent zakoupit.

2 Historie a rozdělení dronů

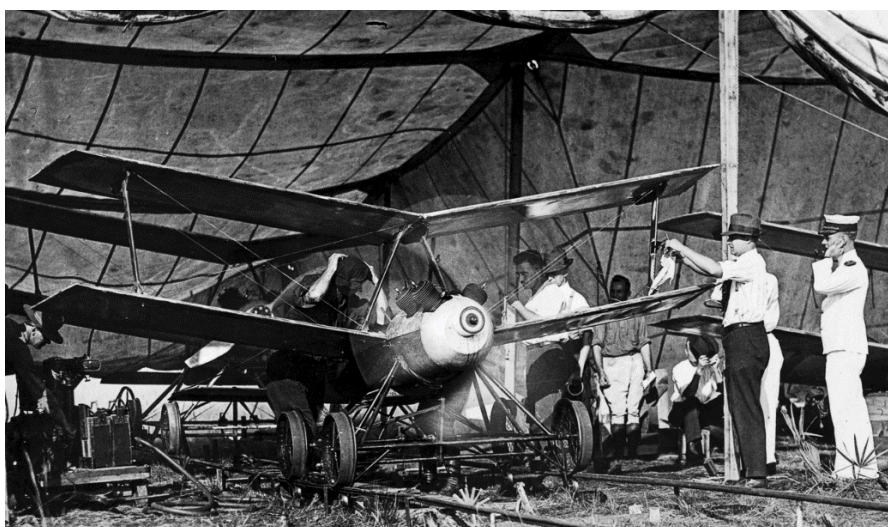
2.1 Historie

Historie dronů v náznamech spadá až do devatenáctého století, kdy si v roce 1898 nechal patentovat Teleautomatizaci Nikola Tesla. Jednalo se „pouze“ o dálkově ovládanou loďku, nicméně i v jeho poznámkách byly nalezeny úvahy o sestrojení dálkově ovládaného letounu [2]. Proto první zmínky o skutečném bezpilotním letadle sahají do období první světové války, kdy přišel na svět dálkově ovládaný letoun, pojmenovaný Aerial Target. Jeho vynálezcem a konstruktérem byl anglický inženýr a průkopník radiových systémů Archibald Montgomery Low.



Obr. 1: Aerial Target v hangáru. [3]

První světová válka přinesla i další bezpilotní letadla, která měla sloužit zejména jako bomby a torpéda. Proto v roce 1916 požádala letadlová rada Spojených států Charlesa Ketteringa o sestrojení bezpilotní létající bomby, která by mohla zasáhnout cíl na několik desítek kilometrů. Vznikl proto projekt bezpilotního letadla Kettering bug, které bylo schopné zasáhnout cíl až na vzdálenost 64 kilometrů. Prototyp byl dokončen těsně před koncem války a i přes počáteční testovací úspěchy nebyl nikdy nasazen v boji. Spojené státy pokračovaly s vývojem Kettering bug až do roku 1920.



Obr. 2: Prototyp bezpilotního letadla Kettering Bug [4]

Až do šedesátých let dvacátého století se bezpilotní prostředky využívaly zejména jako terče pro nácvik střelby a později se začaly využívat i jako průzkumné letecké zařízení, např. ve válce ve Vietnamu a v průběhu arabsko - izraelské války. Po této etapě se drony na nějakou dobu odmlčely a k průzkumu se začaly využívat satelity na oběžné dráze. Až v roce 1995 vzlétl první, skutečně efektivní, průzkumný dron, jak jej známe dnes. Jednalo se o dnes nejznámější RQ-1 Predator (MQ-modifikovaná vyzbrojená verze), který využívá americká armáda. Česká armáda využívala vlastní dron Sojka III až do roku 2010, vyvinutý Vojenským technickým ústavem letectva a PVO o. z. Dnešní vojenské drony dokáží prodloužit dobu letu až přes hranici 24 hodin a je možné je řídit na vzdálenost několika tisíc kilometrů.

Co se týká civilního uplatnění je využití dronů prakticky neomezené. Navíc je dnešní doba, se svou dostupnou technologií, rozšíření nakloněna. V dohledné době je pravděpodobné, že nám budou drony dokonce doručovat balíky. Firma Amazon má s doručováním značné úspěchy a plnému nasazení brání spíše legislativní překážky, než ty technické.



Obr. 3: Dron pro doručování balíků firmy Amazon. [5]

2.2 Legislativa a provoz dronů

Většina lidských činností, zvláště těch technických, podléhá nějaké regulaci a nejinak tomu je i v oblasti bezpilotního létání. V následující kapitole shrneme předpisy, které je nutné dodržovat při manipulaci s bezpilotním prostředkem. Někteří lidé si bohužel myslí, že s vlastním dronem, pokud ho nepoužívají ke komerčním účelům, mohou létat, kde se jim zlíbí, ale nic nemůže být dále od pravdy. Naopak i se soukromým dronem je nutno dodržovat spoustu pravidel a nařízení.

Důkazem o lidské benevolenci k těmto pravidlům je nespočet videí lidí, kteří se s dronem snaží dostat nad mraky (velmi oblíbené!!), létají nad obydlenu zástavbou atd.

Regulaci pro ČR provádí Úřad pro civilní letectví a Mezinárodní organizace pro civilní letectví ICAO. Civilní využívání vzdušného prostoru a provozu letadel podléhá v ČR zákonu č. 49/1997 Sb. a provoz bezpilotních prostředků určuje letecký předpis L2 – pravidla létání v Doplňku X, který vstoupil v platnost 1. 3. 2012.

1) Maximální vzletová hmotnost (MTOM)

V případě komerčního využití dronu je irelevantní jeho vzletová hmotnost, automaticky spadá do nejpřísnější kategorie (viz tabulka v přílohách). V případě běžných soukromých dronů je důležitá hodnota MTOM 0,91 Kg. Za touto hranicí je nutné, aby byl dron vybaven bezpečnostním systémem, který při poruše provede automatické ukončení letu, tzv. Failsafe. Předpokládaná vzletová hmotnost MTOM (Kap. 4.2.1) mnou konstruovaného dronu je cca 2 kg a bezpečnostním systémem bude vybaven.

2) Kde je možné létat

Zde je to trochu složitější, protože musím rozlišovat vzlet, přistání a samotný let, navíc většina soukromých dronů neobsahuje tzv. odpovídač, takže není vidět na radaru, a proto je celkem složité jednoduše definovat prostor pro bezpečné a hlavně legální létání s dronem. Vzhledem k zaměření této diplomové práce je zbytečné všechny možné alternativy (s odpovídačem můžeme k řízenému letišti, například) bezpečných prostorů uvádět a budu se tedy držet varianty dvoukilového drona bez odpovídače, který je konstruován.

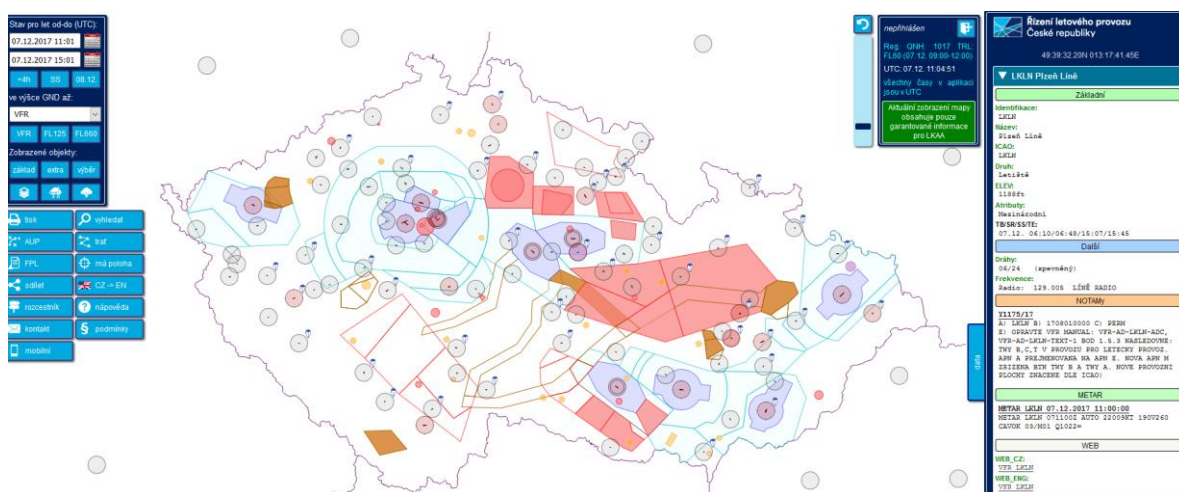
- a) V průběhu vzletu a přistání se **nesmím** přiblížit k jakékoliv osobě jiné než jeho pilot na horizontální vzdálenost menší než 50 m.
- b) Za letu se **nesmím** přiblížit k jakékoliv osobě, prostředku nebo stavbě na horizontální vzdálenost menší než 100 m.
- c) Za letu se **nesmím** přiblížit k jakémukoliv hustě osídlenému prostoru na horizontální vzdálenost menší než 150 m.
- d) Let **může** být prováděn **pouze** ve vzdušném prostoru třídy G, tedy mimo řízené a jinak omezené prostory do výšky **300 m**.
- e) Let **může** být prováděn **pouze** v horizontální vzdálenosti větší než 5 500 m a výšky 100 m od **řízeného** letiště. V případě **neřízeného** letiště (většinou travnaté dráhy) je možné létat do výšky 300 m i vně tzv. ATZ zóny o poloměru 5 km, je však potřeba domluvit se s provozovatelem letiště. Pokud má letiště aktivní službu AFIS (něco jako řízení letového provozu daného letiště), **můžete** až k horní hranici prostoru ATZ, což je 4000 feetů AMLS (střední hladina moře).

- f) **Vyhnout** se zakázaným prostorům LKP (zakázaný prostor-Restricted area) a LKR (omezený prostor-Prohibited area), které jsou například kolem jaderných elektráren, nebo muničních skladů.

Přesné informace o bezletových zónách je možné získat na portálu AisView (<http://aisview.rlp.cz/>)

3) Meteorologická minima

Ve vzdušném prostoru třídy G smí být let prováděn pouze vně oblaků. Zde je jasný rozpor s oblíbenou činností, vystoupat s dronem nad mraky. Což je navíc v rozporu i s posledním nařízením a to, že bezpilotní letadlo nebo model letadla musí být provozován v přímém dohledu pilota, aby během celého letu pilot, nebo pověřená osoba, udržoval vizuální kontakt s letadlem.



Obr. 4: Náhled na obrazovku portálu AisView ke dni 7.12.2017

3 Jednotlivé součásti dronu

Každý dron se skládá z několika základních částí, které jsou pro všechny typy shodné a k jednotlivým rozdílům dochází až při určitém zaměření dronu, zejména s ohledem na podvěšené zařízení, které může být velmi variabilní a různorodé. Dnes lze s dronem provádět velmi specializované činnosti a tím je kladen nárok na různé aplikace, které má daný dron k dispozici.

- Termovizní kamera
- Multispektrální kamera
- Laserový scanner
- Plynové detektory (CO₂)

Vzhledem k zaměření diplomové práce je zvolen dron s připojenou kamerou na podvěšeném gimbalu, a proto se v následujících kapitolách soustředím na takovouto sestavu.

Dalším společným prvkem pro všechny typy dronů je zásadní vliv hmotnosti celé sestavy.

Dnes se hojně využívá karbon, který je velmi lehký a pevný. Jeho velkou nevýhodou je cena a způsob zpracování. Na domácí použití je proto nedostupný.

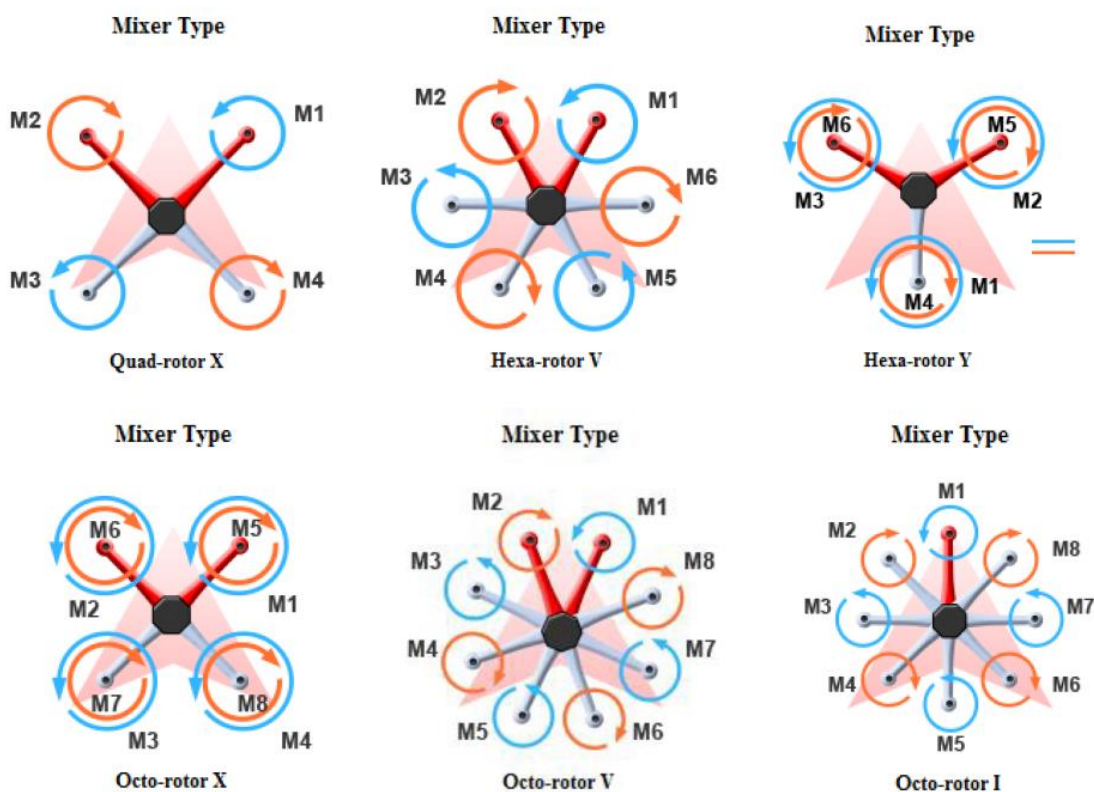
Pojmenování dron je obecný termín pro UAV (bezpilotní letecký prostředek), který může mít různé podoby (vrtulník, letoun atd.). Již zmiňovaný nejznámější vojenský dron Predator je letoun, který má tlačnou vrtuli atd. Vzhledem k zaměření této diplomové práce tak budeme nadále uvažovat dron jako multikoptéru.

3.1 Rám dronu a podvozek (frame kit)

Rám je základní součást každého dronu a dle jeho konstrukce se odvíjí veškeré požadavky na jeho vlastnosti. Základním požadavkem, který je potřeba si definovat, je počet motorů, potažmo ramen. Od počtu motorů se odvíjí chování a výkon dronu. Nejčastěji se používá sudý počet motorů, lze však najít i sestavy s lichým počtem **ramen**, jako trikoptéra, nicméně skutečnost je taková, že každé rameno obsahuje koaxiálně umístěné dva motory s tažnou a tlačnou vrtulí, proto v níže uvedeném schématu je tato konstrukce pojmenována hexakoptéra. Každý z rotorů vytváří kromě vztlaku i krouticí moment, který je například u klasické helikoptéry kompenzován zadním vyrovnávacím rotorem, proto má multikoptéra sudý počet motorů, polovina levotočivých a půlka pravotočivých.

Ramena jsou se zbytkem multikoptéry nejčastěji spojena tzv. centrální deskou, která je složena ze dvou částí, horní a spodní plát. Na spodním plátu jsou vždy umístěny všechny řídicí prvky a dle možností se akumulátor (nejtěžší část multikoptéry) umístí na horní plát. Centrální deska musí být jednou z nejpevnějších částí celé konstrukce, aby změny krouticího momentu byly okamžitě přeneseny do řídicí jednotky, která musí být umístěna uprostřed spodní desky.

Podvozek slouží zejména k ochraně podvěšeného vybavení dronu a ke snadnějšímu vzletu a přistání zvětšením vzdálenosti rotorů od země. Vzhled podvozku není až tak důležitý, může mít podobu ližin, nebo jednoduchých nohou. Hlavním požadavkem je jeho pevnost, protože velmi často musí absorbovat nárazy při přistání a bývá vybaven na stykových plochách lepeným měkkčeným materiálem, čímž je také zabráněno, aby dron při odlehčení nezačal „poskakovat“. U většiny levnějších variant je podvozek pevný a nelze jím manipulovat, což je nevhodné u provedení dronu vybaveného tříosým gimbalem. Při otáčení kamery ve vertikální ose by byly přistávací nohy rušivým elementem na kamerovém záznamu. Takové, většinou už drahé, drony mívají podvozek sklápěcí a přidanou hodnotou takového řešení je i snížení aerodynamického odporu. Manipulace s podvozkiem je umožněna přes spínač na RC vysílači a jištěný bývá i barometrickým výškoměrem, který podvozek automaticky sklápí při určené minimální letové výšce multikoptéry.



Obr. 5: Nejčastější konfigurace motorů u multikoptér. (převzato z aplikace DJI NAZA Assistant)

3.2 Motory

V modelářství se používají různé druhy motorů, dokonce i spalovací, které jsou v multikoptérech z mnoha důvodů nepoužitelné, proto se opět budu věnovat pouze motorům, které jsou používány v této oblasti bezpilotního létání. Jedná se tedy o takzvané BLDC motory, což jsou stejnosměrné bezkomutátorové motory, které mají tu zvláštnost, že rotor motoru je vně a vinutý stator je umístěn uvnitř motoru. Velmi často se lze setkat s nesprávným termínem, že se jedná o střídavý motor, což je samozřejmě nesmysl. Jedná se o stejnosměrný motor s elektronickou komutací. Rotor je vždy tvořen po obvodu připevněnými permanentními magnety, které reagují na změnu magnetického pole, které je střídavě vytvářeno ve vyniklých pólech uvnitř umístěného statoru.

Zásadní rozdíl oproti klasickému stejnosměrnému motoru tkví v absenci komutátoru, který provádí změny směru proudu v cínce rotoru. U velkých strojů je tento systém již celkem spolehlivě vyřešen, ale u takto malých motorů by mohla klasická komutace, s ohledem na dlouhou životnost, vykazovat značné problémy. Komutace je tak řešena elektronicky díky FET tranzistorům umístěným na desce externího řídicího systému tvořícího střídač, jenž dle PWM regulace „přepíná“ proudy do jednotlivých cívek vnitřního statoru. Tento řídicí systém (regulátor) se nazývá ESC a bude podrobněji zmíněn níže. Bezkomutátorové motory mají, vzhledem k váze, větší účinnost

a výkon. Navíc není potřeba pečovat o uhlíky komutátoru. Každý motor má tři fáze a pořadí jejich zapojení je určen směr otáčení motoru.

Nezbytnou součástí pro správné fungování BLDC motoru je zpětná vazba, ESC regulátor musí mít informaci o poloze rotoru vůči statoru, což je nejčastěji řešeno Hallovou sondou.

Hlavní charakteristiky BLDC motorů:

- Počet otáček za minutu (hodnota KV)
- Průměr motoru (krouticí moment)
- Napájecí napětí (počet článků lipol baterie)
- Počet pólů
- Směr otáčení CW a CCW

Se zvyšující se hmotností dronu je potřeba vhodně volit kombinaci motoru a vrtule. Parametr KV úzce souvisí s napájecím napětím a udává počet volnoběžných otáček za minutu. Tzn. v mém případě je hodnota KV 1400 a bude použita napájecí baterie 3S (bude vysvětleno níže), což znamená 11,1 V. Volnoběžné otáčky jsou tedy 15 540 rpm.

Průměrem motoru se nastavuje točivý moment a udává se číselným indexem například 2216. Průměr železné kotvy statoru tak je 22 mm a délka ve směru osy je 16 mm. U některých motorů bývá označení ještě doplněno údajem za lomítkem a představuje počet pólových nastavců (např. 2212 /13), takže motory 2212 /13 a 2212 /10 se liší pouze počtem pólových nastavců a s tím i související hodnotou KV, která je u motoru s deseti pólovými nastavci vyšší (1400), oproti druhému motoru (1000). Většinou tedy platí, že čím větší průměr motoru a tím menší hodnota KV, tím větší krouticí moment.



Obr. 6: Rotor a stator BLDC motoru pro malý, nebo závodní dron (nízká výška a 2300KV)

3.3 ESC regulátor

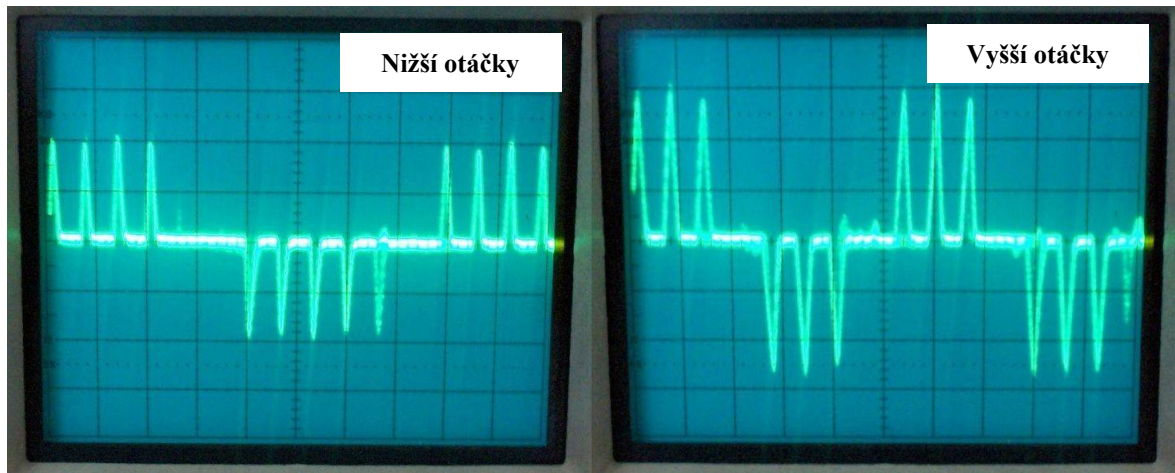
Electronic speed controller je standardní součást, která řídí otáčky elektromotoru na základě PWM signálu z řídicí jednotky, nebo přijímače (transmitteru) RC signálu. Základní součástí každého regulátoru je šest MOSFET tranzistorů, které tvoří střídač, jenž přivádí kvazisinusový proud do jednotlivých fází BLDC motoru (viz Obr. 7). Tento proud se snaží přiblížit sinusovému průběhu a je tvořen vždy spínáním jedné dvojice tranzistorů. Celý proces řídí mikrokontrolér Atmel, na kterém je nainstalovaný firmware, který zpracovává PWM signál a určuje, která dvojice tranzistorů má být otevřena a na jak dlouho. Regulátory od různých výrobců se mohou firmware lišit, například SimonK, BLHeli a často mívají vlastní, nepřevzatý. Firmware lze nastavovat různé parametry, jako například hodnotu minimálního napětí (Low voltage), kdy regulátor začne omezovat otáčky motoru, nebo brzdu vrtule po ubrání plynu (zlepšená obratnost koptéry). Dodatečné nastavitelné funkce jsou závislé na výrobcu konkrétního regulátoru.

Další důležitou součástí je velký kondenzátor, který je připojen paralelně k napájecí části regulátoru a ten slouží hlavně ke stabilizaci napájecího napětí a uchování náboje naindukovaného napětí z motoru. V mezičase, kdy dochází ke změně tranzistorové dvojice, se stává z motoru zdroj napětí a směr proudu je opačný. Díky zpětným diodám (viz Obr. 8) je kondenzátor nabíjen.

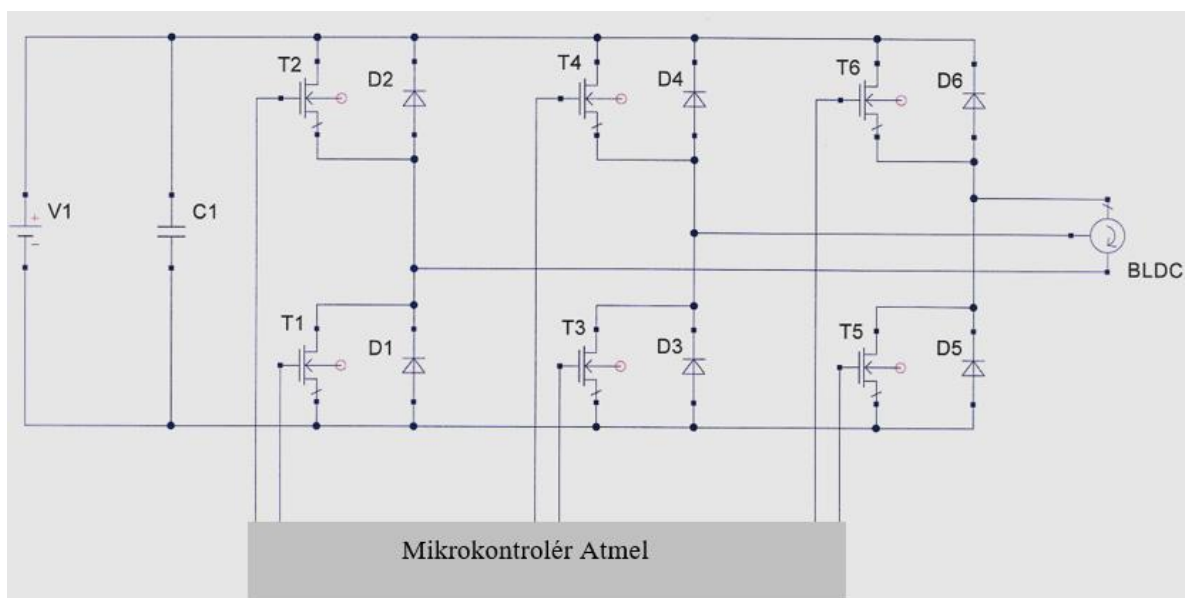
Regulátor je dobré vždy připojovat k napájení co nejkratšími vodiči, které se chovají jako indukčnost a mohou pak způsobovat proudové špičky, které za určitých okolností mohou poškodit MOSFET tranzistory. Jednou z dalších okolností, která k takovému stavu může vést, jsou nekvalitní kondenzátory, které použil výrobce na laciném regulátoru. Takové kondenzátory začnou brzy vysychat a snižuje se tak jejich kapacita. Dobré je tedy použít regulátor od zavedeného výrobce nebo použít regulátor, který má dvojici kondenzátorů.

Hlavním parametrem u ESC regulátorů je proudová zatížitelnost. Nejčastěji se jedná o hodnoty 10, 20, 30 a 40 A. Při hraničním proudovém zatížení dochází k silnému zahřívání MOSFET tranzistorů a možnému poškození celého regulátoru.

ESC regulátory jsou obecně dvojího druhu. OPTO regulátory jenž neobsahují BEC obvod a regulátory jím vybavené, tzv. ESC-BEC. Tento stabilizátor napětí (BEC) vytvoří přesně dané napětí (většinou 5 V) a po připojení ESC regulátoru PWM konektorem k přijímači (receiveru), tento rovnou napájí. Na ESC regulátoru jsou navíc (oproti OPTO) dva tranzistory, které mění střední hodnotu napětí baterie na požadovaných 5 V.



Obr. 7: Průběh proudu jednou fází ESC regulátoru vedoucí do motoru [6]



Obr. 8: Obecné schéma zapojení silové části ESC regulátoru.

3.4 Vrtule

Vrtule slouží k přeměně rotačního pohybu na vztlak. Vždy záleží, jak je vrtule tvarována a jakým směrem se otáčí, čímž dochází na zakřivení vrtule a na její horní hraně k podtlaku, jenž vytváří vztlak a systém má tendenci stoupat. Vše je zapříčiněno vzduchem, který obtéká kolem vrtule.

Na trhu je dnes celá řada vrtulí a je velmi důležité, aby měl každý dron vhodný systém vrtulí, které budou efektivní a hlavně účinné. Máme pět základních parametrů, kterými můžeme jednotlivé typy přizpůsobit našemu požadavku.

- Průměr vrtule (hmotnost dronu)
- Zakřivení (stoupavost)
- Materiál (pevnost, vibrace)

- Počet listů
- Průměr centrálního otvoru

Nejčastěji se používají vrtule dvojlisté, ale na velmi malých dronech lze použít i třílisté. Nejdůležitějším parametrem je průměr a stoupavost vrtule. Vždy se udává v palcích, a proto lze na všech vrtulích nalézt údaj např. 10 x 4,5 L. První údaj (č. 10) znamená průměr vrtule v palcích, takže cca 30 cm a druhý (č. 4,5) je vzdálenost, o kterou by vrtule vystoupala v ideálním případě za jednu otáčku, což je cca 11,4 cm. Čím je vrtule plošší, tím má menší stoupání a naopak. U průměru lze jednoduše říci, že čím je větší, tak unese větší hmotnost. Na delší vrtuli je produkováno více vztlaku a poradí si s těžším dronem. Je s tím však spojen požadavek na větší krouticí moment motoru, potažmo větší proudový odběr. U vrtulí je potřeba dát pozor na směr otáčení, podobně jako u BLDC motoru. Většinou je směr otáčení označen CW, CCW, nebo L, R. V případě chybné rotace vrtule by došlo k opačnému vztlaku, který by dron naopak „přisával“ k zemi.

Neméně důležitým parametrem vrtulí je materiál, ze kterého jsou vyrobeny. Levnější druhy vrtulí jsou vyrobeny z PVC a na menších a hlavně levnějších dronech svou funkci jistě splní. Plastové vrtule jsou náchylné k vibracím a často se při vysokých otáčkách začnou prohýbat. Týká se zejména levných vrtulí od neznámého výrobce. Dnes jsou velmi vhodné kompozitní materiály, například z uhlíkových vláken, nebo v kombinaci s plastem. Takové vrtule jsou velmi pevné a hlavně lehké. Tento faktor je velmi důležitý. Se stoupající hmotností je opět potřeba větší krouticí moment motoru a tím znovu stoupne i proudový odběr, podobně jako u již zmiňovaného průměru vrtule. Některé druhy dronů mají vrtule sklápěcí. Taková vrtule je kompaktnější, ale většinou těžší, proto se sklopné vrtule používají na velkých dronech s více než čtyřmi rameny.

Posledním uvedeným parametrem je průměr centrálního otvoru vrtule, jenž by měl korespondovat s průměrem hřídele motoru. Pokud tomu tak není, jsou k vrtulím dodávány vymezovací kroužky, které lze použít na přizpůsobení centrálního otvoru. U některých vrtulí jsou navíc použity v otvoru tzv. zámky, jež zabrání protáčení vrtule na hřídeli. U většiny vrtulí tomu však není potřeba, protože na hřídeli motoru je použit závit s opačnou rotací, než je smysl otáčení a zajišťovací matka vrtule se tak samovolně utahuje. Proto je důležité hlídat správnost zapojení fází motoru, aby se neotáčel na stejnou stranu, jako je závit hřídele, čímž by došlo k uvolnění vrtule a v krajním případě jejímu sklouznutí z hřídele.

3.5 Letový kontrolér (FC)

Letovým kontrolérem (FC) se rozumí řídicí elektronika, která má na starost komplexní ovládání celé multikoptéry. V této kapitole je záměrně použito slova multikoptéra, protože dron může být i jednoduché letadlo, běžně ovládané pomocí serv a regulátorů. U multikoptér je však

situace mnohem složitější, kdy je potřeba naráz koordinovaně ovládat minimálně čtveřici motorů, stabilizovat celý systém a řídit spoustu dalších funkcí, které budou shrnuty v následující kapitole. Zde už si obyčejným servomotorem na ovládání např. výškovky nepomohu a musím použít již zmíněný letový kontrolér, neboli řídicí jednotku.

Řídicí jednotky lze dnes pořídit za rozumné částky a jako ve spoustě jiných oblastí se cena odvíjí od schopností daného celku. Proto je několik výrobců, kteří mají svou nabídku ještě rozdělenou podle úrovně výbavy a vyrábějí několik výkonových systémů a je pouze na požadavcích zákazníka, k jakým účelům chce danou multikoptéru používat. Mezi nejznámější výrobce patří:

- DJI (A2, NAZA V2, NAZA M Lite)
- Mikro-Kopter
- 3D Robotics (PixHawk, Ardupilot)

Hlavní funkcí řídicí jednotky je vyhodnocování letu, přijímání signálů od RC receiveru (operátora) a v návaznosti na získaných datech přidělovat výkon (otáčky) jednotlivým motorům. Na řídicí jednotce jsou proto PWM výstupy k jednotlivým ESC regulátorům (viz Kap. 3.3). Kvalitní řídicí jednotka musí obsahovat tři základní senzory: gyroskop (náklon), akcelerometr (zrychlení) a barometrický výškoměr. Ve zkratce se tento systém stabilizace nazývá IMU. Řídicí jednotka porovnává data získaná z těchto senzorů s daty od operátora a vyhodnocuje, které pohyby multikoptéry jsou žádoucí a které je potřeba korigovat (např. vítr). Tento systém automatické stabilizace se nazývá Atti mode. Pro pokročilejší stabilizaci je možné ještě řídicí jednotku doplnit snímačem GPS a magnetometrem (kompas), pak je multikoptéra stabilizována v tzv. režimu GPS Atti, a je prakticky možné ji držet ve visu s přesností na jednotky centimetrů. Po vychýlení ze stabilizované polohy je multikoptéra okamžitě vrácena zpět. Dalším rozdílem těchto dvou letových režimů je, že u GPS Atti je po uvolnění směrové páčky ovladače do neutrální polohy multikoptéra stabilizována jak horizontálně (IMU), tak i pozičně (GPS) a multikoptéra zůstane viset na místě. Naproti tomu u Atti mode bude vyrovnána horizontálně, ale bude nadále pomalu pokračovat ve směru požadovaného pohybu i po uvolnění páčky, takzvaně driftuje. Pro správnou funkci těchto snímačů je nezbytné správné umístění řídicí jednotky, která musí být uprostřed mezi rameny multikoptéry a dle směrové šipky také ve směru letu.

Řídicí jednotka musí být také vybavena konektorem, který je možné připojit, pomocí USB kabelu, k počítači a tímto ji konfigurovat. U výrobce DJI je tento konektor navíc vybaven také LED optickou signalizací, kde pomocí jednoduchých světelných signálů multikoptéra signalizuje aktuální stav (chyba, GPS OK, nefunkční GPS, zvolený letový režim a jiné).

Další doplňkovou funkcí stabilizace jsou tzv. orientační režimy (IOC), které mají ještě více usnadnit ovládání multikoptéry. Mezi nejznámější patří Course Lock a Home Lock. Funkce Course Lock je vhodná pro začátečníky, kteří s ovládáním dronu nemají ještě příliš zkušeností.

U multikoptéry se velmi často může stát, že se stroj otočí kolem své osy o 180°, a pak je veškeré ovládání zrcadlově, což může být pro začátečníka matoucí. Tato funkce však zamkne směřování stroje (nos, záda), a pak je pohyb páčky ovladače shodný s pohybem dronu. Jednoduše řečeno, dopředu je dopředu, vlevo je stále vlevo, atd. U druhého módu Home Lock je funkcionalita trochu odlišná. Dron zamkne spojnicí místa vzletu a aktuální pozice. Dron je tedy k operátorovi vždy zády a otáčí se kolem středu (operátora) v kružnici. Vhodné při ztrátě orientace a dohledu nad dronem. Stačí pak zapnout tuto funkci a pohybem směrové páčky ovladače vzad, přivedu dron na místo vzletu.

Posledním velmi důležitým systémem, který by měla řídicí jednotka obsahovat je tzv. Failsafe systém. Od určité hmotnosti dronu je to dokonce povinnost, aby jím byl vybaven (viz Kap. 2.2). Jedná se o automatické bezpečné ukončení letu, na základě přepnutí operátora do tohoto módu, nebo při ztrátě RC signálu. Pak musí být dron schopný automaticky a hlavně kontrolovaně přistát, pokud možno se vrátit na místo vzletu. Velké a hlavně drahé drony jsou navíc vybaveny dalšími bezpečnostními systémy. Jedním z nich je redundance všech důležitých systémů, takže multikoptéra má například dvě řídicí jednotky, dva GPS senzory atd. Pokud je redundance nevhodná, využívá se padáků, které se aktivují automaticky signálem z řídicí jednotky při nebezpečném vertikálním zrychlení, nebo pokynem operátora.



Obr. 9: Řídicí jednotka od firmy DJI verze NAZA Lite, včetně signalizační diody a USB konektoru.

3.6 Rádio ovládání

Každý bezpilotní prostředek, neboli dron je potřeba nějak ovládat. Vojenské drony, jak bylo psáno v úvodu, jsou za určitých okolností autonomní, nicméně pro komerční drony je tohle

legislativně nemožné a operátor musí disponovat prostředkem na jeho kontrolu. Pro klasické modelářské aplikace, včetně ovládání dronů, slouží sestava RC vysílače (transmitteru) a přijímače (receiveru). Tyto dvě zařízení spolu pracují na základě všeobecného oprávnění ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz a hodnota povoleného vyzářeného výkonu je Českým telekomunikačním úřadem stanovena na 25 mW, RC technologie však používají střídání kmitočtů, tak je hodnota maximálního vyzářeného výkonu až 100 mW.

Aby nedocházelo k rušení mezi několika RC systémy, tak musí dojít k tzv. spárování vysílače a přijímače. Obecně se tento proces nazývá Binding. Obě zařízení si zapamatují jedinečné sériové číslo protějšku a nadále komunikují už pouze s ním. Je potřeba si uvědomit, že i ostatní RC systémy pracují na frekvenci 2,4 GHz.

Přijímače pracují s napětím cca 5 V a jeho zdrojem jsou buď přímo ESC regulátory (viz Kap. 3.3), nebo řídicí jednotka, kterou je možné s přijímačem spojit dvěma způsoby. Tradičním způsobem je spojení pomocí futaba konektoru a to na každý kanál přijímače, jeden kroucený zvlášť. Pro klasické multikoptéry, bez přídavných zařízení, je potřeba šesti kanálů. Jeden kanál na každou činnost:

- Stranový směr (aileron)
- Dopředný směr (elevator)
- Plyn (throttle)
- Kormidlo (rudder)
- Volba letových režimů (GPS, Atti, Manual)
- Volba orientačních režimů IOC (Course Lock, Home Lock)

Pokud je vyžadováno i ovládání dalších součástí, například kamery, musí přijímač obsahovat kanálů více, běžně deset. Druhou možností je zapojení všech kanálů do sdruženého konektoru přijímače, běžně nazývaného S-BUS. Pak je potřeba pouze jediného krouceného trojvodiče. Takové propojení řídicí jednotky a přijímače má velkou výhodu v minimalizaci kabeláže a jednoduchosti zapojení. Nevýhodou je, pokud dojde k porušení vodiče, že operátor ztrácí veškerou možnost manipulace s multikoptérou a navíc přijímače vybavené pouze konektorem S-BUS nedisponují mnoha kanály, nejčastěji maximálně osmi.

Přijímače dostávají informaci o poloze páček rádia (vysílače) v podobě vysokofrekvenčního modulu, tento dekodují a převádí na PWM signál, jež ovládá ESC regulátor (u běžných modelů letadel), nebo je poskytován řídicí jednotce, která jej nadále zpracovává a opět ve formě PWM signálu přerozděluje jednotlivým ESC regulátorům multikoptéry.

3.6.1 PWM

Jak již bylo popsáno výše, pro regulaci BLDC motorů je využito pulzně šířkové modulace

(PWM), která je generována přijímačem RC signálu (u normálních modelů), nebo řídicí jednotkou v případě multikoptér. V následující kapitole shrneme základní funkci PWM a jak ovlivňuje otáčky motoru skrze ESC regulátor.

V kapitole 3.3 jsme shrnuli, že díky PWM modulaci je postupně otvírána vždy dvojice MOSFET tranzistorů a díky rychlému střídání je vytvářen kvazisinusový proud na statoru BLDC motoru. PWM modulace funguje na principu dvoustavového signálu, který nabývá hodnoty $\log 0$ a $\log 1$ (tranzistor otevřen/zavřen), důležitá je však tzv. střída signálu. Jednoduše řečeno se jedná o dobu, kdy bude $\log 1$ v porovnání s celou periodou jednoho cyklu. Rychlost otáčení motoru je pak závislá na frekvenci výstupního kvazisinusového proudu (viz Obr. 7).

3.7 GPS

Drony používají pro svou stabilizaci, jak řídicí jednotku IMU, tak u pokročilejších aplikací i systém GPS (viz Kap. 3.5). Takový systém pak musí být vybaven snímačem GPS, který přijímá signál, jež vysílají poziční satelity na oběžné dráze Země. Pokud snímač detekuje více jak tři satelity, je schopen určit přesnou polohu dronu na zemi i nad ní a přesný čas. V uzavřeném prostoru bývá systém GPS stabilizace nefunkční a je potřeba se spoléhat pouze na IMU. GPS systém nám také může sloužit pro předem plánovaný let. Dle přechodu z jedné souřadnice na druhou jsme schopni zautomatizovat a hlavně zpřesnit mapování terénu, dohled nad určitým objektem atd. Snímače GPS signálu bývají také velmi často vybaveny elektronickým kompasem pro správné určení světových stran.

Jak již bylo řečeno, většina snímačů využívá americký systém určování polohy GPS, v poslední době je již možné pořídit i snímače, které jsou kompatibilní s ruskou alternativou systému GPS a to GLONASS.

Určování polohy pomocí jednoho ze systémů je také nezbytné pro správné fungování FailSafe systému, který by měl být schopen přivést multikoptéru automaticky na místo vzletu v případě nějaké závady na RC systému řízení, nebo po pokynu operátora, který FailSafe systém může aktivovat v případě ztráty vizuálního kontaktu s dronem a ten se vrátí automaticky k operátorovi.

Pro správné fungování GPS snímače je nezbytné dodržet tři základní požadavky. Prvním z nich je kalibrace systému pomocí otáčení multikoptéry o 360° v horizontální i vertikální poloze. Kalibraci je nutné provést před prvním letem s nově vytvořenou multikoptérou, nebo po jakémkoliv zásahu do její instalace. Druhým požadavkem je umístění snímače GPS signálu na nejvyšší místo multikoptéry, aby nedocházelo k rušení přijímaného signálu, například od antény FPV přenosu. Proto je tento snímač na multikoptéře vždy dobře rozpoznatelný z důvodu vysokého držáku. Posledním požadavkem je dodržení směrové správnosti snímače dle šipky, která určuje, jak má být snímač orientován pro dopředný let.



Obr. 10: Snímač GPS signálu umístěný na dlouhém držáku a s odhalenou keramickou anténou.

3.8 FPV a přenos video obrazu

V případě multikoptér je dnes už běžným standardem její vybavení snímací kamerou pro pořízení záběrů z výšky. Kamera (fotoaparát) bývá umístěna na otočném držáku, který se nazývá Gimbal (viz Kap. 3.9). Vzhledem k možnému orientování kamery do různých stran, jak horizontálně, tak v některých případech i vertikálně, není možné díky takové podvěšené kameře získat zpět ztracenou orientaci stroje, nebo přesnější odhad vzdálenosti od překážky. Z tohoto důvodu jsou na multikoptérech používány kamery dvě, jedna pro záznam obrazu (podvěšená) a malá palubní kamerka, která je pevně umístěna na nose multikoptéry. Díky této kameře má operátor jasnější přehled o pozici stroje, jak daleko je od potenciální překážky a dokáže multikoptéru přesněji zaměřit na určitý objekt. Takový systém čelní kamery se nazývá FPV (First Person View). Legislativně není dovoleno multikoptéru pomocí FPV řídit bez přímého vizuálního kontaktu, pokud se nejedná o malý závodní dron, kde je tento systém využíván pro závody v uzavřené oblasti.

Pro bezdrátový přenos videa nejčastěji slouží video vysílače pracující s frekvencí 5,8 GHz a to z důvodu, aby se frekvence zásadně odlišila od frekvence RC systému (2,4 GHz), čímž se tyto systémy nebudou navzájem ovlivňovat. Výkon video vysílače je Českým telekomunikačním úřadem omezen opět na 25 mW a zde navíc nedochází ke střídání kmitočtů, tak je nutné se držet pouze tohoto vyzařovaného výkonu, který není úplně dostatečný. Při delší vzdálenosti a hlavně pokud není zajištěna přímá viditelnost, mezi přijímačem a vysílačem dochází k přeskokům a rušení. Určitou pomocí může být vhodné směrování antény vysílače. V takovém případě je dosah maximálně několik stovek metrů. Lze pořídit i tzv. switchtable video transmitters, které mají

vyzařovaný výkon přepínatelný v rozmezí 25, 250 a 600 mW. Vysílání na vyšší výkon však není legální.

Obraz z čelní kamery je přenášen na barevnou obrazovku operátora v rozlišení 640x480 a bývá navíc doplněn o telemetrická data systémem OSD, jenž je spojen s řídicí jednotkou a GPS snímačem. V obraze čelní kamery mám možnost kontrolovat směřování multikoptéry, její výšku, rychlost, přesnou pozici, informace o stavu akumulátoru, počtu GPS satelitů a další důležitá data, která je možno libovolně zobrazovat nastavením modulu OSD.

Žádoucí je, aby multikoptéra měla možnost mezi dvěma kamerami vzdáleně, pomocí RC rádia, přepínat a zobrazovat si na obrazovce obraz té kamery, která je pro mě důležitá. Vhodné je to zejména v případech, kdy potřebuji stabilizovaným dronem zaznamenat konkrétní požadavek, ale pohledem z pozice operátora není možné podvěšenou kameru přesněji zaměřit. K tomuto účelu lze pořídit speciální přepínače, které mají dva video vstupy a jeden výstup. Přepínání probíhá pomocí jednoho z kanálů RC přijímače a páčkového přepínače na rádiu.

Pro chod čelní minikamery, video vysílače a OSD modulu je vyžadováno vyvedení vlastní větve palubního napětí 10 V.

3.9 Držák kamery (Gimbal)

Uchycení podvěšeného záznamového zařízení bývá jednou z nejkomplicovanějších součástí celé multikoptéry. Zejména s ohledem na celkovou váhu kamery, požadavku na její pohyb dle pokynů operátora a hlavně stabilizaci kamery. Celý tento systém se nazývá obecně gimbal. Hlavním faktorem, dle kterého můžu gimbaly dělit je počet os, kolem kterých je možné s podvěšenou kamerou pohybovat. Základní modely jsou dvouosé. Lze tedy kamerou pohybovat pouze horizontálně (kolmo nahoru a dolů) a druhá osa slouží pouze ke stabilizaci. Každá osa má svůj vlastní BLDC motor, který udržuje kameru ve stabilizované poloze na základě náklonu multikoptéry. Je tedy zřejmé, že gimbal musí být vybaven vlastním gyroskopem, který předává informace řídicímu čipu a ten rozhoduje o zapojení jednotlivých motorů pro vykrytí náklonu. Je to podobný systém IMU, jako obsahuje řídicí jednotka. Nebo je většina gimbalů vybavena konektorem, který je možné zapojit právě do řídicí jednotky a využívat data z interního gyroskopu a akcelerometru. Počet konektorů se pak odvíjí od počtu os. Tento způsob má ale určité zpoždění a při testování se neosvědčil. Standardní dvouosé gimbaly mají tedy dva konektory pitch a roll.

Pro správnou funkci gimbalu (možnost vlastního pohybu kamery z pozice operátora) je potřeba, aby jeho zapojení umožňovala již zmíněná řídicí jednotka, což je většinou splněno i u levných modelů. Gimbal je tak skrze řídicí jednotku spojen s RC přijímačem a lze ho jedním zvoleným kanálem ovládat. Jen dražší řídicí jednotky už umožňují zapojení i tříosého gimbalu, který má navíc možnost pohybu vertikálního, lze tedy kamerou otáčet kolem dokola o 360°. Tento systém je u levnějších multikoptér zbytečný, z důvodu požadavku na drahou řídicí jednotku, ale i z pohledu podvozku, který levnější multikoptéry nemívají sklápěcí a statické podvozkové nohy

jsou tak rušivým elementem pro záznamovou kameru.

Jednotlivé osové BLDC motory jsou řízeny PID regulací, která reaguje na data z řídicí jednotky, nebo vlastních snímačů gimbalu. Regulaci lze editovat ve vlastním firmwaru, který má každý výrobce vlastní a je potřeba nastavit vhodné hodnoty jednotlivých parametrů P, I a D. Pokud tomu tak nebude, kamera bude na změny náklonu reagovat zpomaleně, nebo naopak velmi rychle a často začne oscilovat. U dvouosého gimbalu tak může operátor fyzicky měnit pouze již zmíněný horizontální pohyb a je vyžadováno tedy dalšího kanálu na RC přijímači a lineárního otočného přepínače.

Pro napájení gimbalu je opět potřeba vlastní větve palubního napětí 10 V.

3.10 Akumulátory

Pro pohon dnešních RC modelů slouží lithium polymerové (Li-Pol) akumulátory, které již dnes nahradily akumulátory typu NiCd a NiMh. Tyto také dokáží poskytnout potřebný proud, ale jejich velkou nevýhodou je hmotnost. Li-Pol akumulátor může mít, při stejné hmotnosti, až dvojnásobnou kapacitu, ale nevýhodou je zase naopak cena oproti NiCd a NiMh. Standardní také nejsou nabíječky Li-Pol akumulátů, které musí umět tzv. balanční nabíjení (bude probráno níže) a v neposlední řadě je velkou nevýhodou Li-Pol akumulátorů jejich životnost, která je značně odvislá od způsobu, jakým s ním zacházíme. Faktorů, které dokáží životnost akumulátoru omezit, nebo ho dokonce celý zničit, je více a budou shrnuty níže. Ještě je dobré zmínit jednu nemalou výhodu Li-Pol oproti NiMh a NiCd akumulátorům, a touto výhodou je absence tzv. paměťového efektu. Není potřeba akumulátor zcela vybit a pak opět naplnit, aby nedošlo ke ztrátě, nebo ovlivnění kapacity akumulátoru.

Každý Li-Pol akumulátor je složen z několika článků, které jsou spolu spojeny sériově, nebo paralelně, podle toho, zda potřebujeme navyšovat kapacitu, nebo napětí. Vše je vyznačeno na každém akumulátoru písmeny S (sériově), nebo P (paralelně), doplněné o číslo, které značí počet článků. Důležité je zmínit, že každý článek má nominální hodnotu 3,7 V, a proto akumulátor, který je označen např. 3S, má celkové napětí 11,1 V (správně je 3S1P). Je možné se také setkat s označením např. 6S2P, které se bude rovnat zapojení šesti dvojčlánků sériově. Napětí je tedy rovno šestnásobku jednoho článku a kapacita dvojnásobku jednoho článku. Kapacita se vždy udává v jednotkách mAh (miliampérhodiny) a značí dobu, jakou akumulátor bude dodávat uvedený proud. Akumulátor je vždy vybaven dvěma konektory. Jeden je hlavní (silový) pro zapojení odběru a servisní, který je menší a lze jím zjistit hodnotu napětí každého článku zvlášť. Proto pro akumulátor 3S bude mít servisní konektor 4 vodiče, tři články + a zem -.

Dalším velmi důležitým údajem, který je potřeba znát pro práci s Li-Pol akumulátorem, je tzv. hodnota C (C-rate) a vnitřní odpor akumulátoru. Hodnota C je vždy uvedena na štítku a značí, jak velký vybíjecí proud může akumulátor dodávat, ale to není úplně přesné. Akumulátor samozřejmě poskytne i větší vybíjecí proud, ale pak již není zaručen pokles napětí akumulátoru

do 10 %, což může mít neblahý vliv na ostatní technologie, protože napětí může být nepoužitelně nízké. Například akumulátor 3S 5200mAh 25C značí, že celkové napětí je $3 \cdot 3,7 = 11,1$ V, hodinu poskytne vybíjecí proud 5,2 A a max. vybíjecí proud je $25 \cdot 5,2 = 130$ A, aniž by kleslo napětí pod 10 V.

Tím se dostávám k již zmiňovanému vnitřnímu odporu akumulátoru, který není zpravidla nikde uveden, ale tomu nic neubírá na důležitosti. Je potřeba ho změřit pomocí servisního konektoru, zátěže a voltmetru, nebo pomocí dražších Li-Pol nabíječek, které tohle umožňují. Vnitřní odpor přímo souvisí právě s vybíjecím proudem. Čím je tento větší, tak narůstá zahřívání článků akumulátoru dle známého vztahu $P = R \cdot I^2$ a výrazně se tím zkracuje životnost akumulátoru. Hodnota C je na vnitřním odporu dokonce přímo závislá dle vztahu $C = \frac{0,37}{(R_i \cdot kap)}$. Kde hodnota 0,37 je 10 % jmenovitého napětí každého článku, R_i je vnitřní odpor jednoho článku, C je ekvivalent maximálního vybíjecího proudu a $kap.$ je kapacita akumulátoru v Ah. Z výše uvedeného je zřejmé, že hodnota vnitřního odporu R_i je určující pro hodnotu vybíjecího proudu akumulátoru. Zejména s ohledem na skutečnost, že během života akumulátoru roste i vnitřní odpor jednotlivých článků a tím se snižuje tato hodnota, proto stárnutí není lineární, ale ke konci začne silně narůstat.

3.10.1 Pravidla pro zacházení s Li-Pol akumulátorem

Základní parametry Li-Pol akumulátoru:

- Jmenovité napětí článku: 3,7 V
- Napětí plně nabitého článku: 4,2 V
- Minimální napětí před poškozením článku: 3,0 V
- Napětí článku pro skladování 3,8 V kapacita cca 30%
- Provozní teplota 0 - 50° C

Nabíjení:

Pro nabíjení Li-Pol akumulátorů je vždy potřeba použít speciální nabíječku pro tento typ baterie. Jedná se o nabíječku, která pracuje na principu CCCV (CC – constant current, CV constant voltage) a hlavně má funkci balančního nabíjení, která během nabíjení průběžně měří napětí na každém článku a přizpůsobuje dle toho nabíjecí proud. Proto je při balančním nabíjení nutné zapojit jak silový konektor, tak i servisní. V nastavení nabíječky je nutné ještě zvolit hodnotu nabíjecího proudu, která je na akumulátoru definována, jako údaj (nejčastěji) 1C, nebo 2C. Celkový nabíjecí proud je pak roven kapacitě akumulátoru, nebo v případě označení 2C dvojnásobku kapacity. Jsou i akumulátory, které poskytují vyšší hodnoty např. 8C, ale takové nabíjení sice zkrátí dobu, ale výsledná kapacita bude nižší. Tento efekt plyne z již zmíněného principu CCCV, kdy

v ideálním případě nabíječka udržuje konstantní maximální proud (fáze CC) do doby, než stoupne napětí na hodnotu 4,2 na článek a přejde do fáze CV, kdy proud začne postupně klesat při konstantním napětí. Během rychlého nabíjení však dochází, kvůli většímu nabíjecímu proudu, k velkému úbytku napětí na odporu nabíječky, který se počítá do celkového napětí akumulátoru, které nabíječ kontroluje a tím dojde k přepnutí do fáze CV dříve, než je napětí skutečně celých 4,2 V na článek.

Provozní teplota a skladování:

Při vybíjení se akumulátor vnitřním odporem samovolně zahřívá, ale při nabíjení proudem 1C by k zahřívání docházet nemělo a mohlo by značit vadný akumulátor, který je nutné okamžitě odpojit od nabíječky. Li-Pol akumulátory mají vlastnost nafukování a při neúnosném tlaku pak „vyfouknou“ horké plyny. Proto se také doporučuje skladování a nabíjení akumulátorů ve speciálním pouzdře. Li-Pol baterie také nesmí být provozovány a skladovány při teplotě nižší, než je 0° C, takové teploty nevratně poškozují akumulátor.

Baterie nikdy nesmí být dlouhodobě skladována v plně nabitém stavu, ale cca na 30% kapacity, 3,8 V na článek v chladnějším prostředí. Většina kvalitních nabíječek má funkci nabíjení STORAGE, která akumulátor uvede do výše uvedeného stavu pro skladování.

4 Vlastní návrh a stavba dronu

Vlastní stavba dronu je komplexní projekt, ve kterém je obsažena spousta činností, které je potřeba ovládat. Zejména z pohledu konstrukce dronu, práci ve 3D návrhu a hlavně vhodné volbě komponent, které každý dron obsahuje. Zde je navíc potřeba vzít do úvahy finanční stránku celého projektu, která samozřejmě není zanedbatelná a je potřeba s ní do návrhu dronu počítat.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, dnes je velkou výhodou možnost nakupování na různých internetových obchodech. Velmi levně vychází zejména čínské internetové obchody, jako AliExpress, nebo Banggood. Nevýhodou je však praktická nemožnost reklamace. Dalším důležitým nástrojem pro vlastní stavbu dronu je přístup ke 3D tisku určité kvality a zejména legální licenci některého CAD nástroje. Ve zmíněných obchodech lze samozřejmě zakoupit kompletní stavebnice celého dronu, tyto jsou však univerzální a nemusí vyhovovat našim potřebám a navíc já jsem se vydal cestou vlastní stavby, včetně vytištění těla dronu na 3D tiskárně.

Jednotlivé kroky postupu při konstrukci, až po konečný testovací let, budou probrány a popsány v následujících kapitolách. Jedná se však o můj projekt v rámci diplomové práce a některé postupy se nemusí slučovat s doporučením na internetových fórech. Považoval jsem je za nevhodné k mému vlastnímu návrhu, nebo byly informace zavádějící, proto jsem na ně nebral zřetel a držel se vlastní osy návrhu.

4.1 Předběžný návrh dronu

Prvním a hlavním krokem při konstrukci vlastního dronu je určení jeho tvaru (konfigurace rotorů) s ohledem na jakou činnost bude dron využíván. Mohl bych například stavět závodní dron, který bývá malý s krátkými rameny v konfiguraci kvadrokoptéry. Motory bývají vysokootáčkové (2300KV) a celková konstrukce je velmi lehká a hlavně prostá o všechny možné přídavné komponenty, které lze nalézt na dronech pro snímání terénu. Takové drony naopak vyžadují stabilitu, spolehlivost a zejména mnohem větší tah motorů, což vede (u velkých dronů) na hodnoty motorů někde kolem 800KV.

S tahem motorů velmi úzce souvisí také tvar a hlavně průměr vrtulí, čímž se dostávám na vhodnou konfiguraci a hlavně délku jednotlivých ramen dronu, aby se vrtule navzájem neovlivňovaly svojí blízkostí, nebo se v krajním případě nedotýkaly. V takovém případě je potřeba zvolit menší průměr vrtulí, což s sebou nese ovlivnění předpokládaného chování mého dronu a nebo přepracování všech ramen. Každopádně je dobré se takové komplikaci vyhnout.

V zadání diplomové práce je konstrukce víceúčelového dronu, proto jsem zvolil dron s podvěšeným a ovladatelným gimbaelem (držák kamery), včetně stabilizace. Konfigurace dronu byla zvolena (s ohledem na rozpočet) jako kvadrokoptéra, vhodnější by jistě bylo zvolení konfigurace hexakoptéry, která má větší nosnost, stabilitu a hlavně spolehlivost při výpadku některého z rotorů, což u kvadrokoptéry vždy vede k fatálnímu pádu. Dále bylo zvoleno ovládání dle vizuálního pohledu (což vyžaduje legislativa kap. 2.2) s pomocnou online kamerou na těle dronu pro snazší orientaci s televizním přenosem do operátorovy obrazovky na ovládacím panelu, na kterou se zároveň budou přenášet všechna telemetrická data, jako doba letu, výška multikoptéry, směr letu a jiné. Multikoptéra bude tedy vybavena systémem FPV a bude mít hlavní pohyblivou kameru, která bude připevněna na gimbalu a malou nepohyblivou kameru na přední straně dronu. Obraz z jednotlivých kamer bude možné dálkově přepínat na obrazovku operátora dle potřeby. Tento systém byl zvolen s ohledem na případné snímání objektů, které již vizuálním dohledem nedokážu přesně zorientovat a zacílit.

Samostatnou malou kapitolou je podvozek, který je specifický v tom, že je na něj při přistání vyvíjen značný tlak. Jsou některé druhy dronů, které mají podvozek sklápěcí, aby nepřekážel vertikální rotaci kamery, což můj projekt nebude umožňovat. Zvolil jsem proto podvozek statický s vystouplými nohama v každém rohu spodní desky (při následné konstrukci a letových zkouškách bude tento postup přehodnocen).

Dalším velmi důležitým rozhodnutím je vhodná volba řídicí jednotky, která je mozkiem celé sestavy. Dnes není problém sehnat kvalitní řídicí jednotky od několika výrobců a cena již není tak vysoká. Nejvhodnější variantou je použití řídicí jednotky od zavedeného výrobce na poli bezpilotního létání a to firmu DJI. Konkrétně se jedná o typ DJI NAZA Lite, která je plně dostačující pro ovládání dronů do konfigurace hexakoptéra a má možnost zapojení dvouosého

gimbalu. Tato řídicí jednotka se vyznačuje zejména jednoduchostí zapojení a nabízeným vybavením, včetně barometrického výškoměru, akcelerometru a gyroskopu pro stabilizaci polohy. Již podle prvního nástřelu mého dronu je zřejmé, že se bude jednat o poměrně velký dron, který zcela jistě bude přesahovat váhu 0,91 kg a proto musí řídicí jednotka obsahovat také funkci Failsafe systému (viz Kap. 2.2, MTOM hmotnost), což NAZA splňuje. K velikosti dronu se pojí ještě poslední funkcionalita, kterou jsem také zvolil z důvodu stabilizace a to stabilizace celého dronu i pomocí GPS signálu, který spolupracuje s řídicí jednotkou a synchronizuje data s gyroskopem a akcelerometrem. Tím lze prakticky zabránit tzv. driftování při změně směru dronu a nasnímaný obraz z podvěšené kamery bude klidný a plynulý.

4.2 Výpočet MTOM a doby letu

Doba letu je základní ukazatel, od kterého se spousta věcí odvíjí, zejména však jeho hmotnost. Na tomto parametru je doba letu přímo závislá a dle hmotnosti dronu pak vyhodnotím vhodnou kombinaci všech součástí, které použiji. Z tohoto důvodu je pro vzletovou hmotnost zaveden termín MTOM, kterým se následně řídí volba komponent, a ty přímo ovlivňují dobu letu. Dle zjištěné hodnoty MTOM zvolím motory, regulátory a v konečném důsledku hlavně kapacitu akumulátoru. Zde se však dostávám do uzavřeného kruhu. Vzhledem k tomu, že akumulátor bývá jednou z nejtěžších součástí celého dronu a se vzrůstající kapacitou přímo stoupá i jeho hmotnost, musím tedy zvolit silnější motory. Tím opět narostl proudový odběr a dochází k rychlejšímu vybíjení akumulátoru a snížení doby letu. Provádět optimalizaci, ohledně kapacity akumulátoru, není jednoduché ještě z jednoho důvodu a tím je cena Li Pol akumulátorů. Není proto možné nakoupit několik akumulátorů s rozdílnou kapacitou a provádět testování. Jedinou možností je určení teoretické doby letu, která je vypočítána v kapitole 4.3.4.

Dle výše uvedeného je zřejmé, že ideální vybalancování MTOM, volby motorů a akumulátoru(ů) není úplně jednoduchou záležitostí. Jedním z parametrů, který je potřeba dodržet je, že minimální tah motorů musí být alespoň **dvojnásobný** oproti MTOM. Nedodržením této podmínky se samozřejmě zvyšuje doba letu (nižší proudový odběr), ale výkon motorů může být na hranici nosnosti a v případě krizových situací (poryv větru) už nebude dostatek výkonu na řešení vzniklé situace.

4.2.1 MTOM

V kapitole 4.1 jsem si předběžně nadeřadil, jak má budoucí dron vypadat a co by měl určitě umět. Následně je důležitá volba motorů, regulátorů a akumulátorů, a proto je nezbytné určit hmotnost všech komponent, kterou zjistím většinou na stránkách výrobce. U některých komponent je potřeba zvolit dočasnou hodnotu výkonu, výsledná hmotnost se příliš lišit nebude. Pro odhad hmotnosti rámu jsem vytiskl jedno zkušební rameno a jeho váha je 29 g. Obě desky, včetně

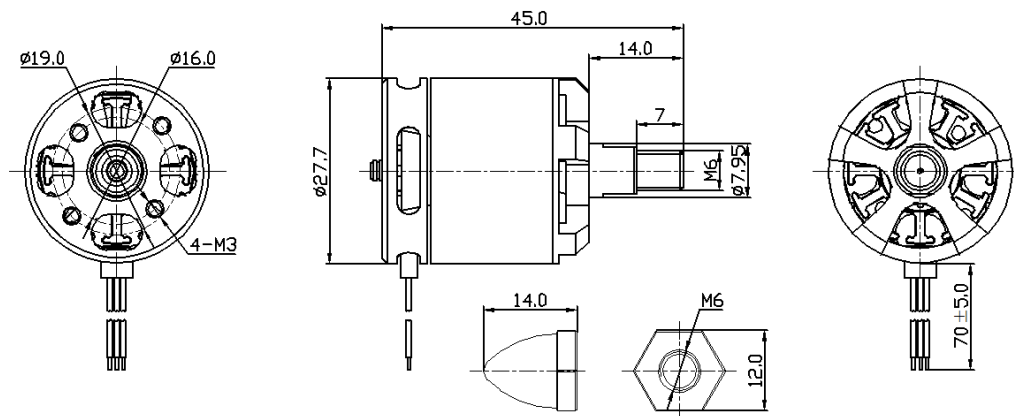
podvozku, součástek uchycení, budu počítat celkem 350 g.

• Řídící jednotka a přijímač	35 g
• Anténa GPS	21,3 g
• Anténa FPV	11,4 g
• Transmitter FPV	6,8 g
• Mini kamera FPV	10,4 g
• Gimbal	212 g
• GoPro kamera	250 g
• 4x ESC (zatím 30A)	200 g
• 4x BLDC (zatím 1000 Kv)	188 g
• Akumulátor (zatím 3500mAh)	280 g
• Rám (odhad)	466 g
• Kabeláž a ostatní	250 g

Maximální vzletová hmotnost MTOM uvažované kvadrokoptéry bude tedy přibližně 2 kg a v návaznosti na tuto hodnotu navrhnu vhodné motory, vrtule a ESC regulátory, tak aby měly nosnost minimálně dvojnásobek MTOM, což odpovídá hodnotě **4 kg**.

4.3 Test BLDC motorů, ESC a výběr nejvhodnějších

Dle výpočtu je potřeba vyvinout vztlak alespoň 4 kg, aby byla dodržena podmínka dvojnásobku MTOM. Tento požadavek lze ovlivnit hlavně vhodným výběrem BLDC motorů a doladit průměrem a stoupáním vrtule (viz Kap. 3.4). Většina výrobců motorů uvádí informativní tabulku, kde je uvedena doporučená vrtule, napájecí napětí (počet článků akumulátoru, viz Kap. 3.10) a vztlak (pull). Pro mé potřeby jsem zvolil dva typy motorů. První s číselným indexem 2212 a rozdílnou hodnotou KV. Druhý 2216 (vyšší krouticí moment) s hodnotou 1400 KV. Dle mého rozvržení jsem zvolil šířku rotoru 22 mm, vzhledem k velikosti plánovaných ramen a toho jsem se držel. Jedná se o takový univerzální rozměr pro většinu běžných dronů mé kategorie a lze je případně nainstalovat i na většinu komerčně zakoupených rámu.

MOTOR OUTLINE DRAWING**MOTOR PERFORMANCE DATA**

MODEL	KV (rpm/V)	Voltage (V)	Prop	Load Current (A)	Pull (g)	Power (W)	Efficiency (g/W)	Lipo Cell	Weight (g) Approx
BR2216	810	11.1	1147	12.9	832	143	5.8	2-4S	66
		14.8	1038	15.6	1065	231	4.6		
	1400	11.1	9045	24.2	1180	269	4.4		
		14.8	8060	36.5	1350	540	2.5		

Obr. 11: Informativní tabulka pro jeden z mnohých zvolených motorů k testu (převzato ze stránek RaceStar.com)

4.3.1 Jednotlivé druhy motorů, vrtulí a jejich parametry

Vybrané motory pro kvadrokoptéru s nosností 4 kg:

- XXD A2212 (1000 KV)
- XXD A2212 (1400 KV)
- Racerstar BR2216 (1400 KV)

Vrtule (kap. 3.4) byly zvoleny dvojího druhu

- Plastové LJI 10 x 4,5
- Karbonové Aeronaut 10 x 4,5
- Kompozitní Gemfan 9 x 4,5

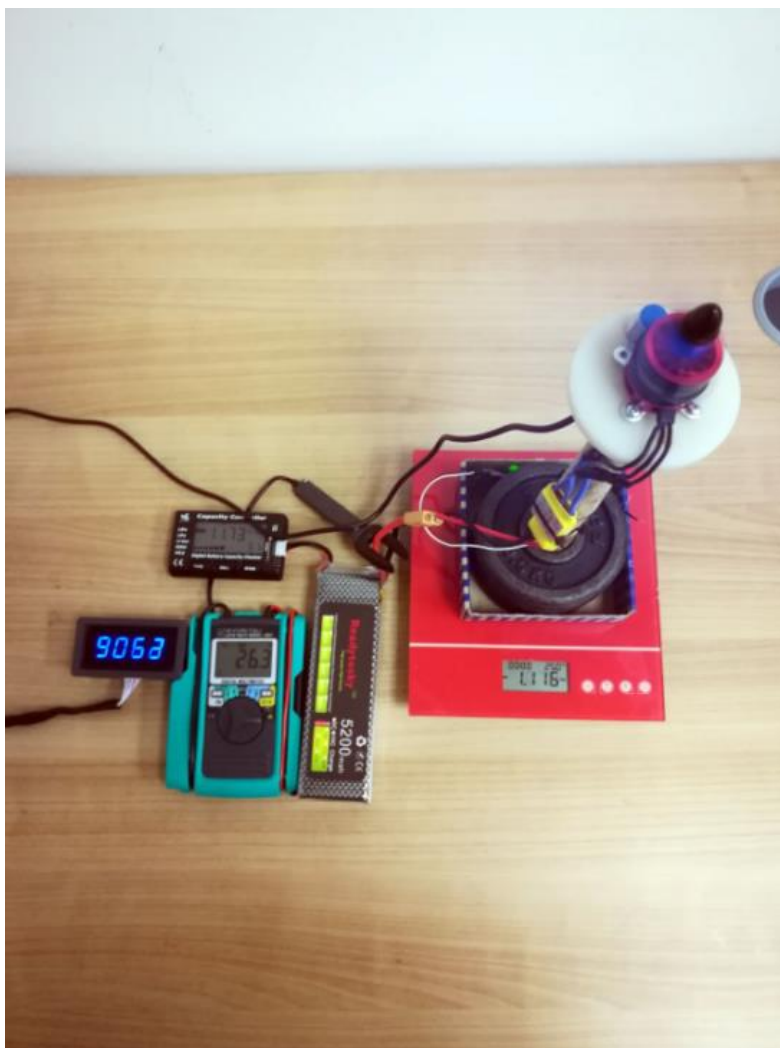


Obr. 12: Pohled na vybrané motory a vrtule pro test, karbonové vrtule Aeronaut jsou vidět na Obr. 24.

4.3.2 Průběh testu

Jak již bylo zmíněno v kapitole výše, byly vybrány tři motory. U jednoho (2216) se podařilo dohledat tabulku výrobce (viz Obr. 11), ale u zbylých dvou se relevantní tabulku najít nepodařilo, proto nemám jasnou představu ohledně dosažitelného vztlaku a hlavně proudového odběru, který je pro mě velmi důležitý. Tento znám u motoru 2216, ale pouze maximální, který však není zcela vypovídající pro následné zjištění průměrné doby letu. Maximální proudový odběr je samozřejmě pouze při maximálním vztlaku motoru, který nebude dosahován neustále a navíc jen pro jeden typ vrtule.

Před finálním objednáním zbylých motorů bude proveden test, jenž určí, který z motorů je pro dron nejvhodnější. Zejména se zaměřím na vztlak, který každý motor dokáže vyvinout s jednotlivou vrtulí a také celkový proudový odběr v celém rozsahu otáček. Tento není lineární a se zvyšujícími se otáčkami strmě vzrůstá. Pro pohon motoru byl použit regulátor otáček s maximálním proudovým zatížením 30 A. Vztlak určím jednoduchým pokusem, kdy každý motor bude upevněn na 2,5 kg těžké závaží s hallovou sondou a snímačem otáček. Odebíraný proud z akumulátoru jsem změřil digitálním ampérmetrem KYORITSU s rogowského cívkou a pokles napětí na akumulátoru testerem Lipol akumulátorů. Pro regulaci otáček jsem použil RC rádio a transmitter FlySky.



Obr. 13: Nejvyšší dosažená hodnota vztlaku u motoru 2216 s vrtulí 10 x 4,5

4.3.3 Výsledky testu a konečný výběr motoru

Výsledky testu dopadly jednoznačně pro motor RaceStar 2216 1400 Kv v kombinaci s vrtulí o rozměru 10 x 4,5. Při maximálních otáčkách (9047 RPM) dosahoval tento motor vztlaku 1113 g, což je pro můj dron naprosto dostačující, navíc i s rezervou výkonu. Celkový vztlak vyvinutý těmito čtyřmi motory by měl být teoreticky cca 4,4 kg a díky této rezervě je možné dron v budoucnu vybavit větší kamerou nebo jiným vybavením, které navýší MTOM. Pokud porovnáme výkon všech motorů se stejnou vrtulí, tak nejhůře dopadl motor 2212 1000 KV, což se předpokládalo, ale rozdíl vztlaku je skutečně značný (max. 698 g). Takový motor by absolutně nedokázal vyhovět mým požadavkům. Maximální vztlak by byl lehce za hranou samotné hmotnosti dronu, natož aby dodržel podmínku dvojnásobku MTOM. Ve výsledku by se dron s takovým motorem zřejmě vznosl, ale manipulace s ním by byla značně komplikovaná a řešení krizové situace zcela nemožné. Díky slabým motorům se navíc zbavím možnosti případného rozšíření dronu o další komponenty. Proudový odběr je však velmi nízký a to 13,6 A. (viz tabulky v příloze).

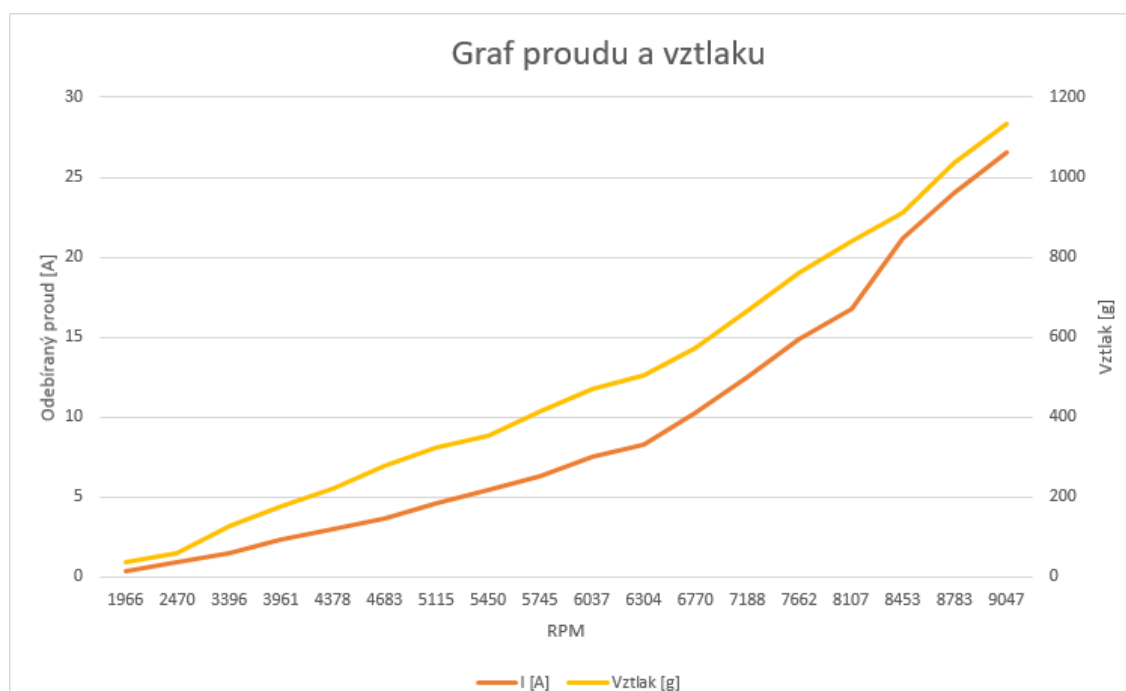
V následné tabulce pro motor RaceStar 2216 1400 KV je vidět, jak odebíraný proud začne

strmě narůstat od hodnoty vztlaku 500 g a konečná hodnota dosáhne bezmála 27 A. Taková hodnota odebíraného proudu je těsně pod hranicí zvoleného regulátoru otáček (ESC) a také bylo zřejmé, že se regulátor při testu značně zahřívá. To by mohl být závažný problém při určitých klimatických podmínkách v létě, a proto bude zvolen regulátor o vyšší proudové zatížitelnosti 40 A. Jedná se spíše o preventivní opatření, protože odběru 27 A bude regulátor otáček vystaven pouze nárazově, nicméně není dobré zanedbat případné odstavení regulátoru tepelnou ochranou (pokud je jím firmware vybaven), nebo zničení proudovou špičkou. Rozdíl v ceně vyššího regulátoru je zcela zanedbatelný, zejména s ohledem na celkovou cenu multikoptéry. Výsledky ostatních motorů a vrtulí budou uvedeny v příloze diplomové práce. Test byl samozřejmě pouze orientační, ale vypovídající hodnotu, pro mé potřeby jistě má. Zajímavým zjištěním je malý pokles napětí na akumulátoru, který dosáhl hodnoty pouze 0,54 V, takže se jedná o tvrdý zdroj, což je akumulátor vždy, nicméně tento je evidentně velmi kvalitní.

U motoru 2216 1400 KV je také možné operovat s menší vrtulí (9 x 4,5) což mělo za následek nepatrné snížení vztlaku na hodnotu 1004 g (stále plně dostačující) a s tím také klesl proudový odběr (24,3 A), což se pozitivně promítne na výdrž. Současně stouply otáčky, díky menšímu aerodynamickému odporu vrtule, na hodnotu převyšující 10 000 RPM, což snímač nedokázal zobrazit a dle odhadu se otáčky mohly přiblížit hodnotě 11 000 RPM.

Tab. 1: Tabulka naměřených hodnot vztlaku a odebíraného proudu pro motor 2216 s vrtulí 10 x 4,5.

RPM	I [A]	U [V]	Vztlak [g]
1966	0,40	12,46	38
2470	0,90	12,46	61
3396	1,50	12,46	128
3961	2,30	12,46	178
4378	3,00	12,44	223
4683	3,70	12,42	277
5115	4,60	12,42	323
5450	5,40	12,40	355
5745	6,30	12,39	413
6037	7,50	12,38	472
6304	8,30	12,35	504
6770	10,30	12,19	571
7188	12,50	12,13	665
7662	14,90	12,09	759
8107	16,80	12,05	841
8453	21,20	11,97	911
8783	24,00	11,92	1037
9047	26,60	11,92	1133



Obr. 14: Graf závislosti odebraného proudu a vztlaku u motoru 2216 s vrtulí 10 x 4,5.

4.3.4 Doba letu a vhodný výběr akumulátoru

Pro výpočet předpokládané doby letu budu uvažovat, že kvadrokoptéra ustáleně visí ve vzduchu a motory tedy vyvíjejí celkový vztlak shodný s tíhou stroje, který jsem výpočtem odhadl na 2 kg. Na každý ze čtyř motorů tedy připadá vztlak 500 g. Dle výše uvedené tabulky a grafu pro zvolený motor mohu říci, že pro takový vztlak je odpovídající hodnota proudu asi 8 A, celkový odebraný proud tedy bude v ideálním případě 32 A. Pro dobu letu bude nyní určující, jakou kapacitu akumulátoru zvolím. Důležité je počítat se skutečností, že bezpečně lze vyčerpat pouze 80% celkové kapacity akumulátoru. Navíc je potřeba počítat se skutečností, že vybíjení akumulátoru není lineární a ke konci značně roste. Pokud budu uvažovat akumulátor, který byl použit i pro test motorů, tak tento má kapacitu 5200 mAh, ale využitelných je přibližně 4160 mAh. Nyní je určení doby letu už jednoduchou záležitostí, kdy 4,16 Ah vydělím odebraným proudem a vyjde doba letu ve visu necelých 8 min. Tento výsledek je založen na skutečnosti, že kvadrokoptéra pouze visí a celková doba letu se proto může ještě snížit.

Předpokládaná doba letu kvadrokoptéry tedy není nijak závratná, ale akumulátory s vyšší kapacitou jsou již dražší a navíc znatelně stoupá i jejich váha, což má za následek zvýšení MTOM a tím i odebraný proud, proto je tato problematika trochu začarovaným kruhem, který není úplně jednoduché vybalancovat. Každopádně kvadrokoptéra bude vybaven FPV kamerou a operátor obrazovkou, na kterou se budou promítat veškerá telemetrická data, včetně výšky, GPS lokalizace, aktuální kapacity akumulátoru a doby letu. Skutečná doba letu bude ověřena až zkušebním letem. Zatím tedy uvažuji akumulátor s kapacitou 5200 mAh.



Obr. 15: Hodnoty vnitřního odporu R_i jednotlivých článků u dvou různých značek akumulátorů s kapacitou 5200 mAh 35C.

Dle kapitoly 3.7.1 je dalším důležitým parametrem hodnota C , což je maximální vybíjecí proud, při kterém daný akumulátor ještě garantuje pokles napětí do 10%. Tento parametr je důležitý z hlediska spolehlivosti kvadrokoptéry, protože při velkém poklesu napětí může regulátor motoru vyhodnotit velikost napětí jako nízkou a začne omezovat, nebo dokonce vypínat motor. Dle Obr. 15 je patrné, že hodnoty vnitřního odporu článků u žlutého akumulátoru jsou alarmující a podrobím ho výpočtu na maximální vybíjecí proud. Ač má štítkovou hodnotu 35C (182 A). Pro výpočet použiji článek s nejvyšší hodnotou R_i , takže $8 \text{ m}\Omega$ a kapacitu 5,2 Ah.

$$C = \frac{0,37}{(R_i * kap)} = \frac{0,37}{(0,008 * 5,2)} = 8,89[]$$

Dle výpočtu je patrné, že skutečná hodnota akumulátoru bude pouze 9C, což odpovídá maximálnímu odebíranému proudu cca 46 A. To je však hodnota značně blízká uvažovanému odebíranému proudu kvadrokoptéry ve visu (32 A), která bude v reálu značně vyšší a nastává riziko nebezpečného poklesu napětí. Druhý akumulátor je s velikostí vnitřního odporu nejslabšího článku na velmi dobré úrovni a výpočtem zjištěna hodnota 18C, což je cca 93 A. Zbývající dva články skutečně odpovídají hodnotě 35C.

4.4 Konstrukce dronu v programu SolidWorks

Jednou z hlavních a největších částí dronu je jeho rám (frame kit), který může mít mnoho podob (viz Kap. 3.1). Jak již bylo řečeno výše, já jsem zvolil rám ve tvaru kvadrokoptéry, jehož součásti budu tisknout na 3D tiskárně. Materiál pro 3D tisk bude ABS plast, nebo PLA plast, což je biologicky rozložitelný materiál a má za určitých okolností vyšší pevnost než ABS [7]. Celý 3D návrh jednotlivých součástí bude proveden v programu SolidWorks a rám se bude skládat ze čtyř ramen, dvou centrálních desek a nohou. Jednotlivé součásti budou spojeny pomocí vrutů a zafixovány ještě akrylátovým tmelem.

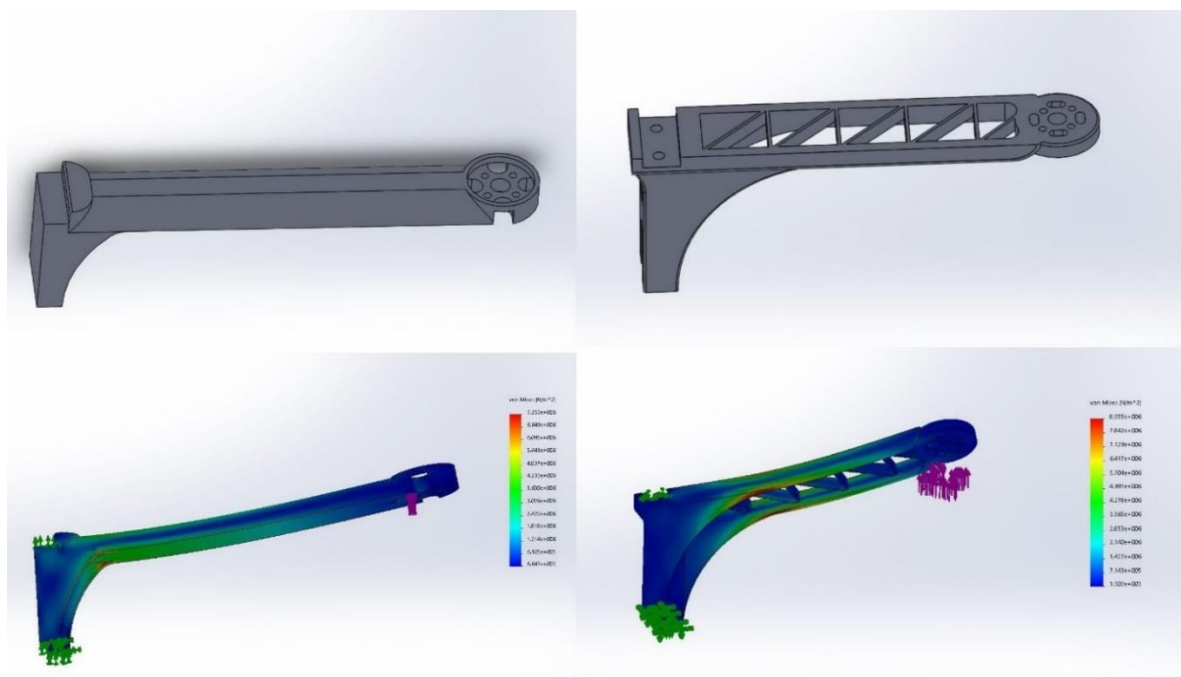
4.4.1 Vytvoření 3D modelu rámu

Pro vytvoření vhodného modelu rámu je potřeba uvažovat několik omezujících faktorů. Základním je, že tiskárna dokáže vytisknout součásti o maximální délce 200 mm, což je za určitých okolností limitující například u ramen. Z důvodu pevnosti vytisknuté součásti je vhodné používat systém vzpěr, které mají tloušťku 1,4 mm, což je přesně cesta trysky tiskárny tam a zpět. Opět se týká zejména ramen.

- **Ramena**

Bylo vyzkoušeno vytvoření ramene s plným tvarem, bez využití vzpěr, ale od tohoto modelu bylo ustoupeno z důvodu velké spotřeby materiálu, dlouhé doby tisku a pevnost se tímto nijak znatelně nezvýší. Což potvrdila simulace tlaku v programu SolidWorks i jednoduché fyzické ohnutí zkušebních ramen. Bylo proto vytvořeno několik modelů ramen se systémem vzpěr, kde nevhodnější se jeví model, který je uveden níže a nevhodný je zobrazen například v kapitole 4.4.2.

Dále bylo ustoupeno od zapuštění motoru do snížené gondoly (viz plné rameno na Obr. 16), což by bylo vzhledově jistě efektnější, ale přístup chladícího vzduchu do postranních nasávacích otvorů motoru by byl značně omezen. Proto byl 3D návrh přehodnocen a motor byl umístěn na rovnou plochu ramena. Požadavek na umístění motoru do gondoly byl pouze kosmetický prvek, který měl vizuálně sjednotit napojení motoru na rameno. Navíc došlo ke zkrácení ramena z důvodu velikosti použitých vrtulí. Po testu (viz Kap. 4.3.2) vím, že budou mít velikost 10 x 4,5 a není nutné tisknout rameno zbytečně dlouhé (200 mm), aniž by se jednotlivé vrtule navzájem ovlivňovaly.



Obr. 16: Ukázka 3D návrhu dvou ramen, plného s gondolou na motor a za použití vzpěr (žebrování) bez gondoly, včetně simulace zatížení. Rameno vpravo bylo nakonec vybráno jako konečné.

- **Centrální desky a podvozek**

Dvě centrální desky byly navrženy následovně. Hlavní požadavek byl, aby bylo možné mezi ně umístit patky jednotlivých ramen a celý komplet se dal jednoduše sešroubovat k sobě vruty o průměru 5 mm. Původní myšlenka byla umístit do každého rohu jednu stabilní pevnou nohu, která by byla také vytištěna na 3D tiskárně, tento způsob podvozku se však neosvědčil, protože při zkušebních letech se vždy podařilo jednu nohu ulomit. Nepodařilo se jednoduše docílit takové pevnosti, aby se jednotlivé nohy nedostávaly pod takový tlak při přistání, navíc stabilita nebyla dostačující a dron jakoby „přepadával“. Byly zkoušeny různé návrhy jednotlivých nohou, ale žádný nebyl zcela vyhovující (viz Obr. 17).

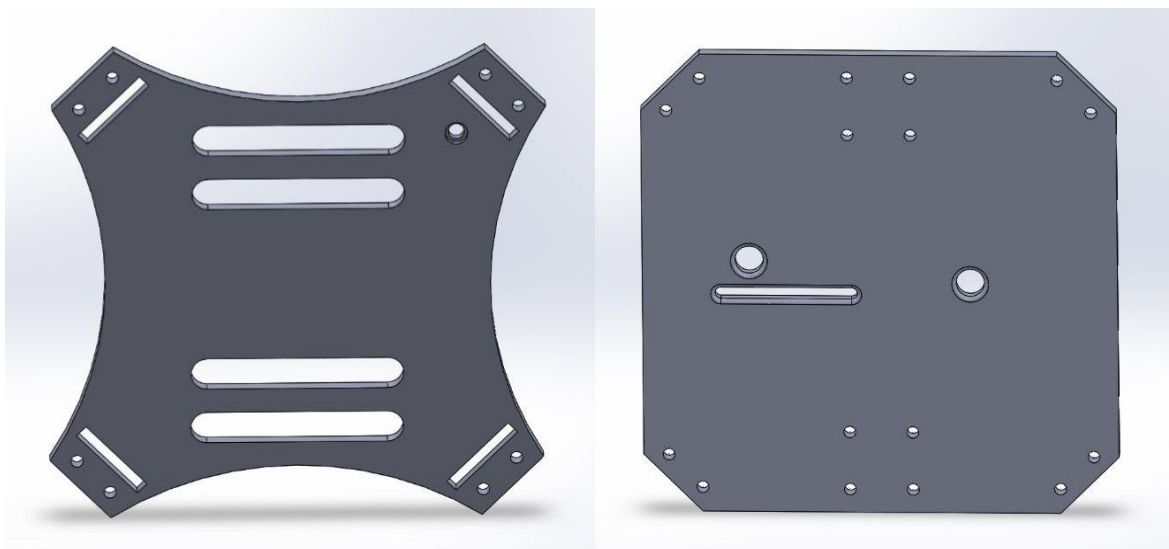
V tomto směru byl proto učiněn ústupek, že se nohy nebudou tisknout na 3D tiskárně a budou raději použity karbonové ližiny, které jsou se stabilitou a hlavně pevností na jiné úrovni. Vzhledem k tomu, že v běžných podmínkách není možné karbonové nohy vyrobit, byly proto zakoupeny jako komplet.

U spodní centrální desky byl navržen vodící žlábek („kolejnice“) pro instalaci gimbalu s kamerou, který je díky tomu možné posunout dopředu nebo dozadu, v závislosti na požadavku umístění kamery, aby třeba nesnímala podvozkové nohy atd.

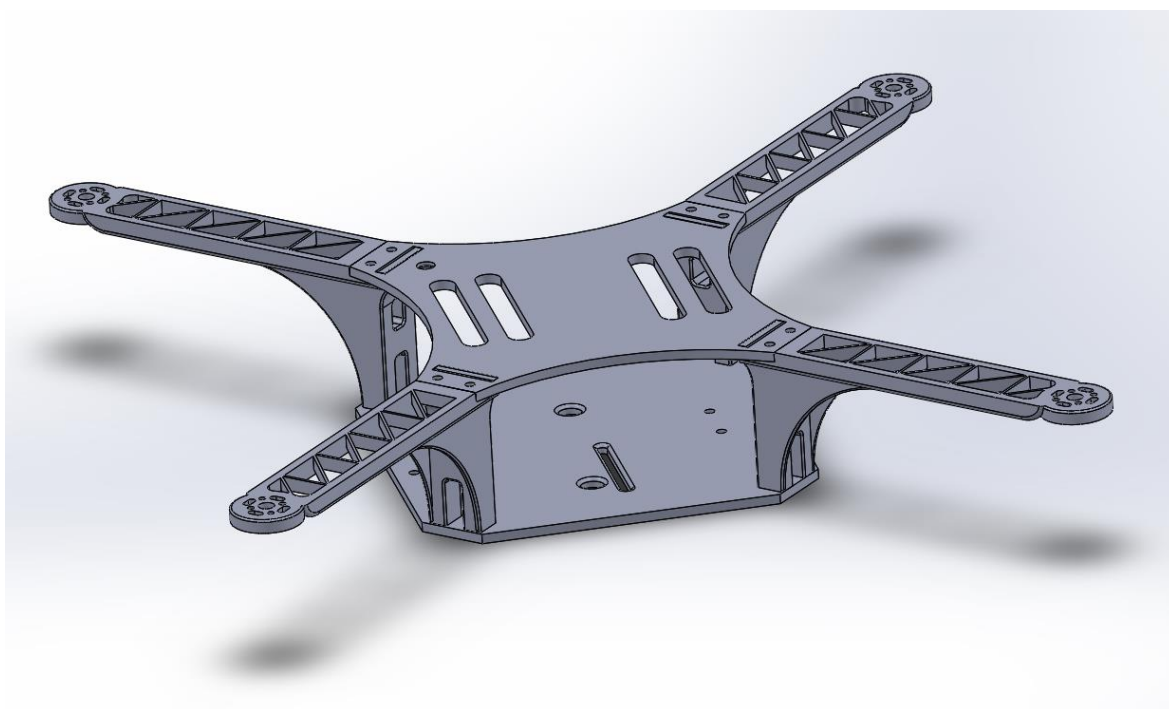
Horní centrální deska je specifická dvěma velkými oválnými výřezy, které umožňují provléknutí jisticích pásků na suchý zip a budou hlavním fixačním prvkem akumulátoru na desce. Instalace ostatních prvků (řídící jednotka, transmitter atd.) na spodní centrální desku bude provedena samolepícím suchým zipem, aby bylo možné tyto prvky přesouvat nebo zcela sejmut.



Obr. 17: Návrhy provedení konstrukce podvozkových nohou.



Obr. 18: Návrh horní a dolní centrální desky, na návrhu vpravo je vidět „kolejnice“ pro uchycení gimbalu.

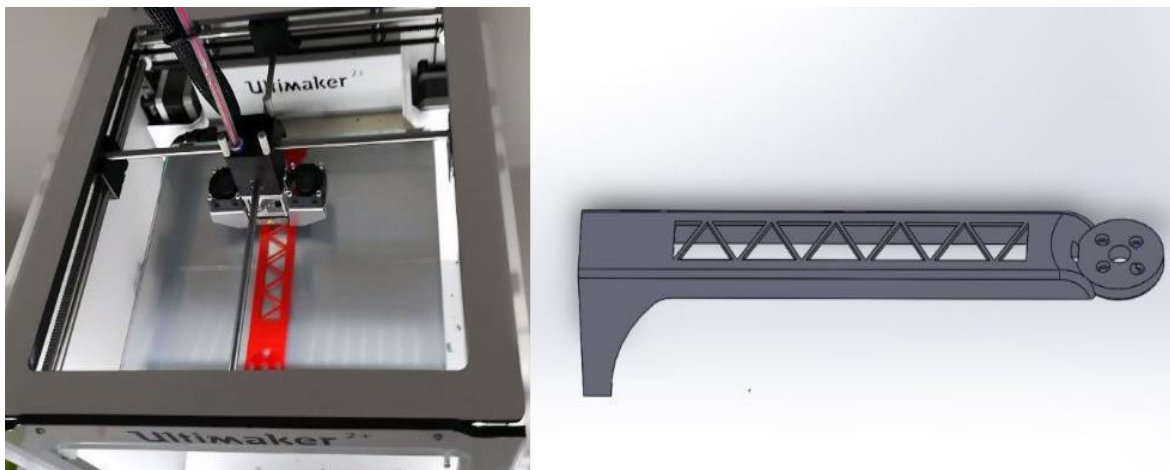


Obr. 19: Celkový pohled na 3D model rámu bez podvozkových nohou.

4.4.2 Konečný 3D tisk jednotlivých součástí

Tisk jednotlivých součástí probíhal na 3D tiskárně Ultimamaker 2+ a zkoušely se dva typy materiálů, ABS a PLA. Rozdíl mezi těmito dvěma materiály je v zásadě jednoduchý, PLA plast je vyroben z obnovitelných materiálů (kukuřičný škrob) a je snadno tisknutelný. Oproti ABS plastu má vyšší pevnost, ale je méně pružný a neodolává tolik vyšším teplotám (PLA 60 °C, ABS 100 °C). ABS plast odolává rozpouštědlům a je možné ho lepit, nicméně tisk je náročnější a navíc se zdálo, že výsledný výrobek je znatelně těžší. Každý z obou materiálů má své výhody a nevýhody. Pro mé potřeby je hlavním parametrem pevnost výsledného výrobku a váha. Vysokým teplotám

vystavován nebude a lepení bude probíhat pouze akrylátovým tmelem. Snadnost tisku je jistě také kladnou devizou, aby bylo možné zkusit různé varianty finálního výrobku. Výsledný rám dronu jsem tedy vytiskl z filamentu PLA.



Obr. 20: Tisk jednoho zkušebního ramena, zde konkrétně z ABS filamentu a jeho 3D návrh.

4.5 Rozvod palubního napětí, včetně pozičního osvětlení

Pro napájení všech komponent multikoptéry slouží zvolený akumulátor 5200 mAh s celkovým napětím 11.1 V. Jednotlivé součásti dronu mají ale napěťovou hladinu rozdílnou, a proto je nutné multikoptéru vybavit regulátory napětí, které jsou schopny díky BEC obvodům úpravy na 5 V a 10 V. Tento požadavek lze řešit několika způsoby, zakoupením a instalací jednoduchých UBEC regulátorů, nebo použitím tzv. Power boardů.

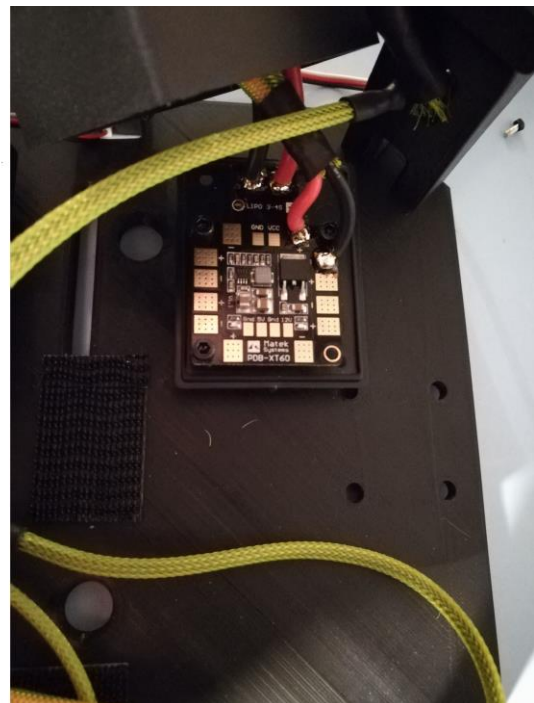
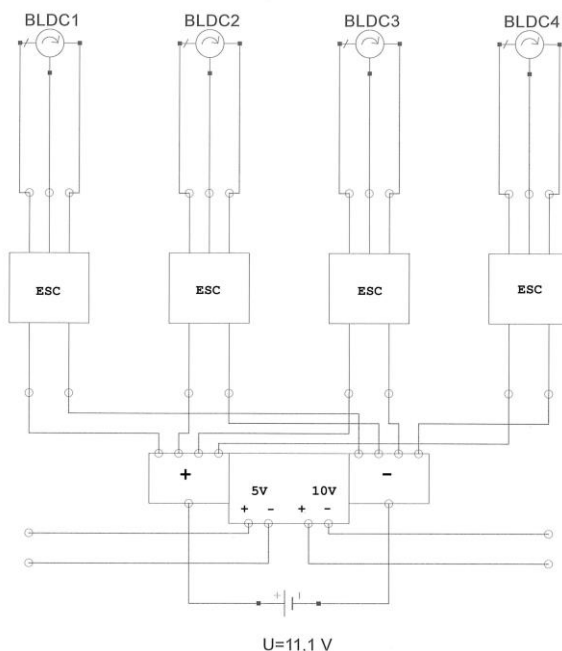
Při regulaci palubního napětí díky UBEC je dále potřeba realizovat napájecí uzly hlavního pohonu, tzn. napájení ESC regulátorů přímo z akumulátoru. Je potřeba si uvědomit, že přívod do tohoto uzlu bude značně proudově zatížen (cca 40 A) a je nutné tomu přizpůsobit průřezy vodičů. Na rozvod palubního napětí jsem použil lankových měděných vodičů se silikonovou izolací, která je velmi ohebná a tepelně odolná. Průřezy jsou voleny dle doporučení výrobce, na základě proudové zatížitelnosti u jednotlivých komponent, jako jsou hlavní přívod z akumulátoru, přívody k jednotlivým regulátorům a motorům. Průřezy vodiče se silikonovou izolací jsou nejčastěji utříděné dle dvou systémů, amerického jako AWG a evropského v mm^2 . U hlavního přívodu je doporučeno použít průřez 12 AWG, což odpovídá průřezu $3,3 \text{ mm}^2$ a proudové zatížitelnosti max. 70 A. Přívody z hlavního uzlu k ESC regulátorům jsou pak realizovány nižším průřezem 14 AWG ($2,08 \text{ mm}^2$, 45 A).

U prvního prototypu multikoptéry byl uzel realizován pomocí WAGO svorek, což bylo velmi komplikované z důvodu velkého množství kabeláže, která se ve WAGO svorce často uvolňovala a hlavně byl systém nepřehledný. Jako vhodnější řešení se naskytlo použití již zmíněného Power boardu, který v sobě kombinuje vytvoření uzlů pro ESC regulátory a zároveň

UBEC obvodů na dvou napěťových hladinách 5 a 10 V. Na Power board se vodič připájí a spoj je pevný bez rizika jeho nechtěného uvolnění, což by vedlo k okamžité havárii multikoptéry. Power boardy se vyrábějí pro různé hodnoty proudového zatížení, zvolil jsem proto hodnotu 45 A, která je pro můj systém dostatečná. Na vedlejší napěťové hladiny jsem zapojil další periferie multikoptéry.

5 V: poziční osvětlení (Arduino)
 čelní minikamera
 OSD modul

10 V: gimbal
 video transmitter



Obr. 21: Zjednodušené schéma zapojení silové části a pohled na Power board s napájeným jedním ESC regulátorem a přívodními vodiči.

Silová kabeláž multikoptéry je vedena v pletených chráničkách, jenž je prevencí před poškozením kabelů vibracemi a jiným fyzickým namáháním. U sestavené multikoptéry je totiž složité kontrolovat jednotlivé kabely a předejít tak jejich poškození. Samotné konce chrániček jsou zajištěny smršťovací bužírkou, aby nedocházelo k jejich rozplétání.

Power board byl díky ochraně umístěn do unifikované plastové krabice, kde byl zafixován šrouby. Celá krabice byla upevněna na centrální desku samolepícím suchým zipem, aby byla umožněna případná oprava a její snadné uvolnění. Stejná plastová krabice byla použita i pro umístění čipu Arduino, který ovládá poziční osvětlení multikoptéry. To je realizováno již zmíněným čipem a supersvitivými LED diodami, které jsou zabudovány na každém konci ramena, včetně předradného odporu. Při návrhu ramen bylo s touto alternativou již počítáno

a konce ramen byly opatřeny otvorem pro přesné umístění LED diody o velikosti 3 mm. Čelní strana multikoptéry je realizována zelenou barvou a zadní strana červenou. Veškerá kabeláž se pak sbíhá u Arduina, kam byl nahrán jednoduchý program na rychlé blikání, aby bylo možné snadněji rozeznat orientaci multikoptéry.



Obr. 22: Poziční LED diody a konečné sestavení ramen, včetně všech komponent.

4.6 Vhodný výběr gimbalu a jeho testování

Pro mé potřeby a hlavně dle úrovně vybavenosti multikoptéry, byl vybrán dvouosý gimbal, který je konstruován na uchycení sportovní GoPro kamery. Gimbal je celohliníkový, vybaven vlastním gyroskopem a dvěma stabilizačními BLDC motory. Operátor bude moci ovládat kameru pouze v horizontální ose a ke stabilizaci bude využíván vlastní gyroskop. Při testech s využitím informací od řídicí jednotky a jejího IMU docházelo k nepatrnému zpoždění, ale hlavně vykrývání náklonů multikoptéry neprobíhalo zcela hladce a držák kamery se často zasekával v nevhodné poloze.

Elektronika gimbalu je vybavena USB konektorem, přes který je možné nastavovat hodnoty PID regulace (bude probráno níže). Veškeré nastavení parametrů gimbalu se provádí software SimpleBGC GUI. Zkratka BGC znamená „Brushless Gimbal Controller“ a jedná se o aplikaci, kterou lze ladit gimbalu vybavené bezkomutátorovým stabilizačním motorem.

Gimbal bude upevněn na spodní části centrální desky v podélné kolejnici, aby ho bylo možné umístit do libovolné vzdálenosti od okraje přední části multikoptéry a nastavovat tím úhel snímání kamery. Aktivní část gimbalu je oddělena od centrální desky pomocí silikonových tlumících manžet, které budou eliminovat mikrovibrace od motorů. Veškerá kabeláž bude vedena

průchodkou, která byla vytvořena již při tisku centrální desky. Jedná se o napájení (10 V vedené přímo z power boardu), dvě kroucené trojlinky s futaba konektorem pro zapojení konektorů pitch a roll do řídicí jednotky a video kabel ke GoPro kameře, který je veden do přepínače video signálu. Konektory pitch a roll jsou zapojeny z důvodu možného ovládní kamery přes RC rádio.

Ruční ovládní gimbalu probíhá opět pomocí PWM modulace, kterou generuje RC přijímač, který přes řídicí jednotku posílá signál do horizontálního BLDC motoru pro náklon kamery. Na RC rádiu byl vybrán lineární otočný ovladač, kterému byl přiřazen jeden z kanálů a tento byl nastaven v řídicí jednotce pro gimbal.

4.6.1 Nastavení gimbalu a PID regulace

Nastavování veškerých parametrů gimbalu probíhá pomocí USB kabelu a aplikace SimpleBGC GUI. Nejdůležitější je vhodně zvolit hodnoty PID regulace pro stabilizaci kamery a konečných úhlů pro maximální náklon držáku kamery.

PID regulace je zkratkou slov proporcionálně intergačně derivativní regulace a používá se běžně ve spoustě odvětví, například při regulaci teploty a jiné. Základním prvkem je písmeno P, tedy proporcionální regulace, která násobí odchylku požadované a skutečné hodnoty konstantou, čímž přidává, nebo omezuje určitý výkon. Pokud bude konstanta nulová, tak i přidávaný výkon bude nulový a regulátor nebude na změnu reagovat. V případě gimbalu zvětšuje, nebo zmenšuje proud BLDC motorem a díky tomu dochází k regulaci náklonu multikoptéry. Pro omezení překmitů při dosažení požadované hodnoty slouží složky I a D. Složka I (integrační) reguluje výkon po překročení požadované hodnoty a postupně přidává a ubírá, až se výkon ustálí na požadované hodnotě. Správně nastavená složka I dokáže soustavu ustálit například pouze s jedním překmitem. Pomáhá tomu i poslední složka D (derivativní), která reaguje ještě před tím, než výkon hraniční hodnotu překročí a výkon ubere dříve a tím překmity ještě omezí. Všechno toto je jednoduché shrnutí pro pochopení, jak BLDC motory reagují na data z gyroskopu a akcelerometru. Pokud hodnoty PID regulace nebudou nastaveny správně, projeví se to kmitáním motorů a neklidným chováním. Pro detekci sebemenších kmitů je aplikace SimpleBGC vybavena aktivním vykreslováním jednotlivých veličin a mým cílem je tyto kmity co nejvíce omezit. Pro každou osu (motor BLDC) je jedna křivka.

Dalším důležitým parametrem pro pohyb kamery je nastavení maximálních úhlů, kterých bude kamera dosahovat. U eliminace stranových výkyvů multikoptéry byl nastaven maximální úhel $+45^\circ$, vyšších úhlů by multikoptéra při letu neměla dosahovat a proto se nepředpokládá větší náklon než uvedený. U ručního ovládní kamery pohybu nahoru a dolů byl stanoven rozsah úhlů od 0° do -70° . Při nula stupních směřuje objektiv kamery přímo před multikoptéru a není potřeba s ní otáčet výše, protože už by objektiv zabíral spodní část multikoptéry, což je zbytečné. Po dosažení -70° je objektiv směřován prakticky kolmo dolů a více stupňů již opět není potřeba dosahovat, protože spodní část kamery s držákem by narážela do konstrukce gimbalu a došlo

by k oscilacím. Posledním parametrem, jenž je nezbytné nastavit, je tzv. Angel mode, který zabezpečí, že po vychýlení kamery operátorem do spodní polohy se držák automaticky vrátí do krajního úhlu 0° po uvolnění otočného spínače na RC rádiu.

Před prvním letem je nutné ještě provést kalibraci gyroskopu a akcelerometru při aretovaném držáku, včetně kamery. Aplikace obsahuje elektronickou „vodováhu“ pro oba směry pitch a roll, díky které nastavím přesně vodorovnou polohu kamery a provedu kalibraci, která určí referenční úhly náklonů.

4.7 FPV videopřenos

K instalaci FPV videopřenosu na multikoptéru bylo přistoupeno z důvodu jednodušší orientace v prostoru a účinnějšímu zaměřování podvěšené kamery, které by z pohledu ze země bylo velmi komplikované. Operátor bude mít k dispozici barevný sedmipalcový monitor s rozlišením 1024 x 600, kam se bude obraz z obou kamer přenášet. Díky RC přepínači video signálu bude možné vybírat, kterou kameru operátor na obrazovce uvidí. Díky zařazení OSD modulu do videopřenosu jsou do obrazu promítána telemetrická data, jak bylo zmíněno v kapitole 3.8.

Pro přenos videa byl zvolen transmitter EWRF 7086, a to z důvodu malých rozměrů, ale zejména díky možnosti přepínání výkonu, čímž je dodržena legislativa o maximálním vyzářeném výkonu 25 mW. Frekvence přenosu je 5,8 GHz a obraz lze přenášet na jednom ze 48. kanálů. Tento transmitter má ještě jednu velkou výhodu proti ostatním, a to samostatný DC 5 V výstup pro napájení malé čelní kamery, díky tomu se zjednodušila instalace kabeláže napájení. Samotný transmitter je napájen z power boardu hladinou 10 V. Podvěšená GoPro kamera má vlastní napájení akumulátorem. Jako anténa byla zvolena tzv. „Mushroom Antenna“ (tvar houby) pro frekvenci 5,8 GHz se ziskem 2,0 – 2,5 dBi a konektorem SMA.

Obrazovka operátora je připojena video cinchem k přijímači (receiveru) RC832, který je vybaven stejnou anténou jako vysílač a napájení je realizováno malým LiPol akumulátorem s kapacitou 1400 mAh a napětím 11.1 V. Jednotlivé komponenty jsou zafixovány na zadní stranu obrazovky samolepicím suchým zipem. Obraz z jednotlivých kamer je možné měnit díky malému RC přepínači, který má dva video vstupy, jeden video výstup a PWM vstup, který se zapojuje přímo do RC přijímače. Díky dvoupolohovému přepínači na RC rádiu je pak možné obraz z kamery měnit na obrazovce dle potřeby.

4.8 Konečná kompletace dronu

Konečné sestavení všech komponent probíhalo v několika částech, které budou shrnuty v následující kapitole a podrobně popsán:

- **Sestavení ramen**

Každé rameno bylo vybaveno prostorem pro osazení LED diody pozičního osvětlení (dvě červené a dvě zelené), jenž byla v otvoru zafixována transparentním lepidlem společně s předřadným odporem (150 Ω) a izolována smršťovací bužírkou. Dalším krokem byla fixace motorů do připravených otvorů pomocí šroubků a zkrácení vodičů jednotlivých fází motoru. Na vodiče byly napájeny pozlacené konektory typu „banánek“ velikosti 3 mm. Stejně zkrácení vodičů proběhlo také u ESC regulátorů, na které byly napájeny naopak pozlacené „zdiřky“. ESC regulátory byly umístěny na spodní stranu ramen, které byly projektovány na předpokládanou šířku regulátorů a zafixovány stahovací páskou. Důležité bylo ohlídat správnou orientaci motorů v návaznosti na typ motoru (CW a CCW) a barevné zabarvení LED diod, aby nedošlo například k situaci, kdy budou „zelená“ ramena osazena stejným typem motorů. Vždy musí být levotočivý a pravotočivý na jednu barvu. Před dokončením ramen bylo provedeno testování smyslu otáčení motorů a osvětlení LED diod pomocí napájecího zdroje a PWM modulátoru.

- **Centrální deska**

Na spodní centrální desku byla upevněna již sestavená ramena a to pomocí vrutů do předem připravených otvorů a provedeno zajištění akrylátovým tmelem. Po instalaci ramen bylo možné zjistit potřebnou délku napájecích vodičů k ESC regulátorů a tyto připájet na power board umístěným v plastové krabici. Napájecí vodiče byly zabezpečeny pletenou chráničkou. Z power boardu byly vytaženy další dvě větve palubního napětí 5 a 10 V, které jsem připravil pro další instalaci komponent. Po napájení všech vodičů byla krabička uzavřena, aby byl power board chráněn proti povětrnostním vlivům, případným zkratům a prachu. Napájecí power board je jednou z nejdůležitějších součástí a pájení je potřeba věnovat značnou pozornost, aby bylo eliminováno riziko případných „studených spojů“, které by vedly k okamžité havárii kvadroptéry. Volba vhodných průřezů vodičů je podrobně probrána v kapitole 4.5.

Symetricky na druhou stranu centrální desky byla umístěna shodná plastová krabice, jako v případě power boardu, do které byl instalován Arduino čip, včetně čtyř dvoulinkových vodičů od LED diod. Napájení bylo provedeno z již připravené větve 5 V. Do čipu byl nahrán jednoduchý program na blikání diod a ten je možné kdykoliv upravit pomocí USB konektoru.

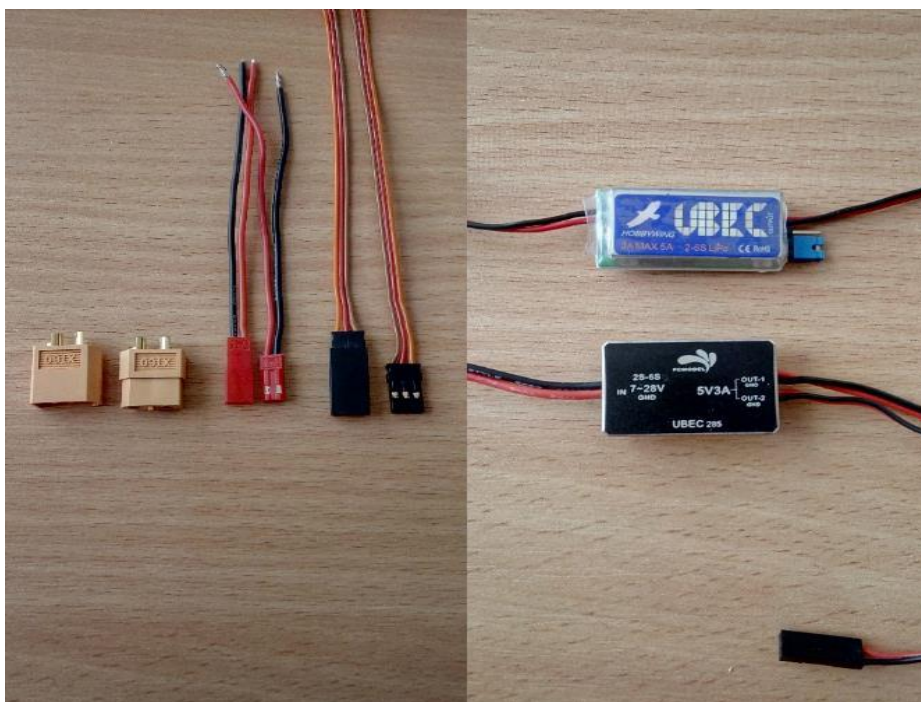
Do přesného středu centrální desky, byla umístěna řídicí jednotka a zapojeny PWM konektory od ESC regulátorů. Je důležité dodržet správné zapojení motorů podle smyslu otáčení dle Obr. 5. Je nezbytné pohlídat, aby motor s označením M1 byl zapojen do konektoru M1 na řídicí jednotce atd. Na stejné straně konektorů M1 – M6 jsou ještě dva konektory F1 a F2, které slouží pro ovládání gimbalu, já jsem si kabely zatím připravil a protáhl průchodkou na spodní stranu desky. Řídicí jednotka a ostatní komponenty byly na desku upevněny pomocí samolepících suchých zipů, které jsou na jednu stranu dostatečně pevné, ale zároveň je možné komponenty

od spodní desky demontovat bez jakéhokoliv poškození. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.5, musí být řídicí jednotka umístěna ve směru letu dle naznačené šipky.

Na zadní straně řídicí jednotky jsou umístěny konektory jednotlivých RC kanálů, které jsem zapojil dle schématu pro tradiční zapojení. Schéma nalezneme v návodu k řídicí jednotce. Vzhledem k situaci, že bude využito celkem osm kanálů RC přijímače, není vhodné použití sumárního kanálu S-BUS (viz Kap. 3.6). Antény RC přijímače jsem upevnil stahovací páskou k ramenům. Další připravenou průchodkou byl veden kabel ke konfiguračnímu USB konektoru, který je implementován do modulu signalizační LED diody a byl připevněn oboustrannou lepicí páskou na spodní stranu centrální desky. Konektor byl zapojen do označení LED na řídicí jednotce. Přesné schéma zapojení jednotlivých vstupů a výstupů řídicí jednotky je zobrazeno v přílohách.

Na čelní stranu spodní desky byla umístěna malá FPV kamera, která bude snímat situaci před kvadrokoptérou. Video kabel byl zapojen do jednoho vstupu RC přepínače a výstup z něho do OSD modulu. OSD modul bude přenášet telemetrická data do obrazu, a proto do něho musí být zapojen také GPS snímač. Napájení (5 V) FPV minikamery je umožněno díky video vysílači EWRF, který má samostatný napájecí výstup pro tyto účely. OSD modul je napájen z řídicí jednotky, ze které přebírá ostatní telemetrická data, jako výšku, směr, kapacitu akumulátoru a jiné.

Posledním krokem u centrální desky je instalace gimbalu do připravené kolejnice. Ovládací vodiče jsem si již připravil při instalaci řídicí jednotky a stačí tedy protáhnout průchodkou ještě napájení (10 V, JST konektor), připravené po instalaci power boardu do krabice. Gimbal se musí zafixovat na silikonové manžety a zapojit správně dvě kroucené trojlinky do konektorů pitch a roll. Po připevnění kamery do držáku je nutné provést kalibraci dle kapitoly 4.6.1.



Obr. 23: Použité konektory. Napájecí XT 60 a JST, datové Futaba. Regulátory napětí UBEC

- **Podvozkové nohy**

Na podvozkové nohy bylo 3D tiskem zkoušeno několik prototypů, jejichž 3D návrhy jsou na obrázku v kapitole 4.4.1. Žádný z návrhů se však spolehlivě neosvědčil, z důvodu malého prostoru k testování. 3D tiskárnu nebylo možné využívat neomezeně a díky celkem značné hmotnosti kvadrokoptéry podvozkové nohy při přistání ztlačily, čímž docházelo k praskání. Vzhledem k nastalé situaci bylo přistoupeno k použití již vyrobených karbonových nohou s ližinami, které byly zakoupeny. Z tohoto důvodu bylo také nutné přerýsovat centrální desku a znovu ji vytisknout s připravenými otvory pro upevnění karbonových nohou. Po přišroubování nohou na spodní stranu desky došlo ke ztlačení stability celé kvadrokoptéry, jak při přistání tak vzletu.

- **Horní deska**

Poslední etapou celé kompletace bylo zpevnění kvadrokoptéry horní deskou, která výřezy přesně zapadne do připravených výstupků na ramenech a slouží také k upevnění akumulátoru, pomocí suchých zipů a upevňovacích pásků. Na horní desce je také otvor pro instalaci antény video vysílače systému FPV. Celý rám (frame kit) byl spojen vruty o velikosti 5x20 mm do připravených otvorů, které byly vyztuženy černým akrylátovým tmelem. Dva spojovací vruty byly zároveň použity k připevnění držáku GPS snímače.



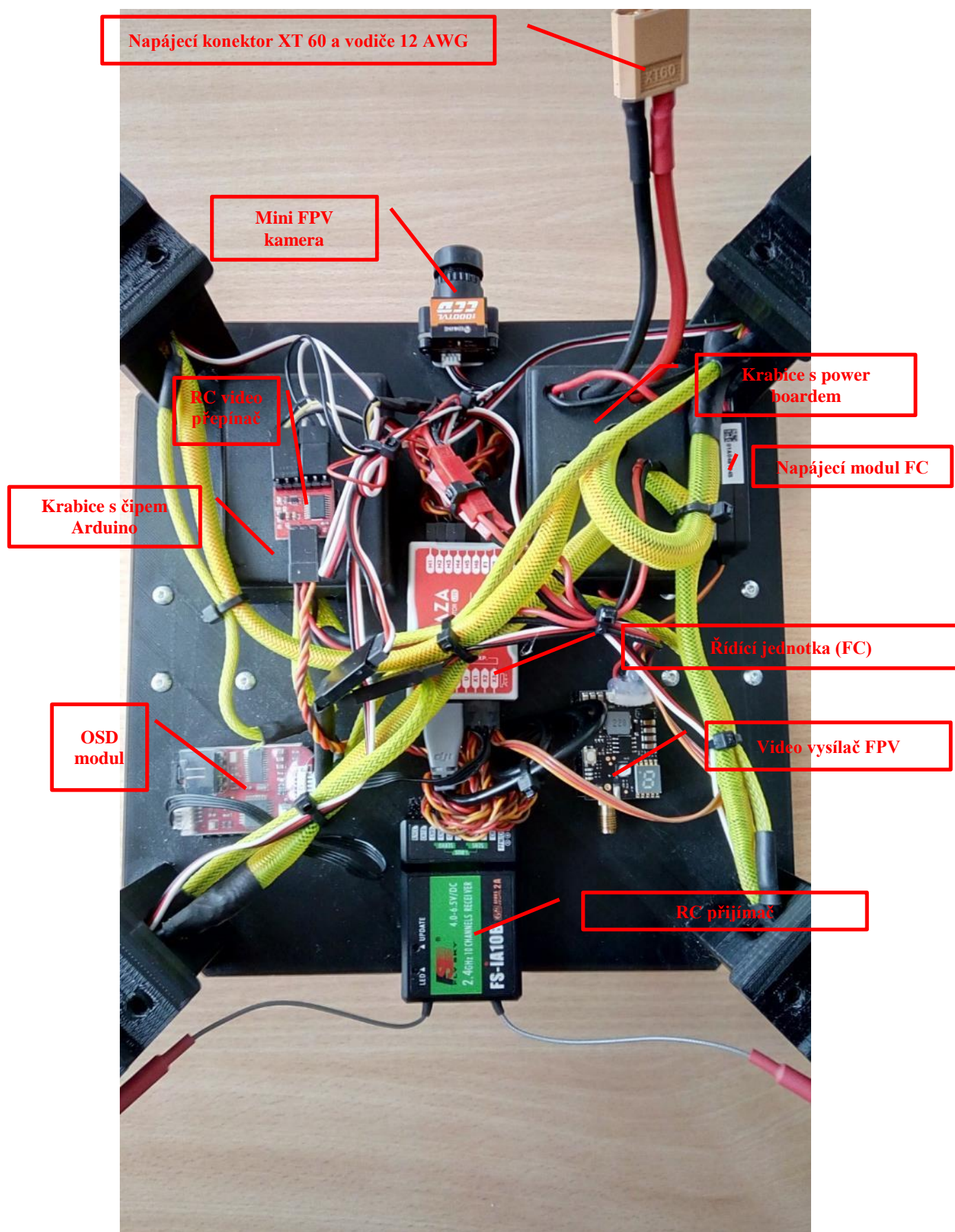
Obr. 24: Pohled na zkompletovanou kvadrokoptéru.



Obr. 25: RC ovladač včetně monitoru s obrazem z čelní kamery a telemetrickými daty.



Obr. 26: Fotografie z druhého testovacího letu.



Obr. 27: Celkový náhled na rozmístění jednotlivých komponent dolní centrální desky.

4.9 Závěr

Jak již bylo řečeno v úvodu diplomové práce, vlastní stavba dronu (v našem případě kvadrokoptéry) je komplexní činnost, která vyžaduje znalosti z několika oblastí a ty jsou podrobně popsány v celé diplomové práci. Největší problém však nastal při testování sestavených prototypů.

Při stavbě vyplouvaly na povrch různé problémy, které se řešily průběžně. Jedním z takových problémů bylo například použití nekvalitních plastových vrtulí, které se u prvního prototypu rozvibrovaly do té míry, že nakonec škrty o samotná ramena a došlo k odlomení tří ze čtyř motorů, aniž by se kvadrokoptéra pohnula z místa. Celkem byly vytvořeny tři prototypy kvadrokoptéry, které se postupně vyvíjely až do konečné podoby, která je prezentována před zkušební komisí. Tento poslední prototyp byl odzkoušen dvěma zkušebními lety a vše proběhlo bez nejmenších problémů. Od dalších zkušebních letů bylo zatím ustoupeno, aby díky nezkušenosti operátora, nedošlo k havárii a případnému zničení třetího prototypu. Na kompletaci čtvrtého by již nebyl časový prostor. Druhý prototyp byl totiž po fatální chybě operátora, kdy došlo ke kolizi se stromem, z velké části poničen a došlo i k úplnému znehodnocení některých součástí. Ty se musely nahradit, což s sebou neslo finanční stránku věci, ale zejména také časovou, kdy doručení náhradních dílů ze zahraničních e-shopů trvá řádově několik týdnů.

Dalším omezujícím faktorem byl „neúplný“ přístup k firemní 3D tiskárně, kterou jsem mohl využívat pouze za určitých okolností, a díky tomu nebylo možné plně testovat různé návrhy a hlavně materiály (filamenty). Nakonec byl přece jen vybrán materiál (PLA), který byl pro mé potřeby vhodný a to jak svou pevností, tak hmotností. Naopak velkou výhodou byla možnost využívat k objednání všech komponent již zmíněných zahraničních e-shopů, které jsou příznivé hlavně svými cenami.

Vývoj mého dronu nelze asi nikdy považovat za ukončený, při konstrukci dalšího prototypu by se mohlo u spousty věcí postupovat jinak a zkušeněji a tím celou sestavu neustále vylepšovat. Jak řekl známý letecký konstruktér Willy Messerschmitt: „Ještě než je zhotovena maketa nového prototypu letadla, konstruktér už ví, co se na něm dalo udělat lépe“

5 Citace

- [1] KARAS JAKUB, TICHÝ TOMÁŠ. *Drony*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2016. 264 s. ISBN 978-80-251-4680-4.
- [2] Přichází věk dronů? Odkud se vzali fantomové oblohy i zábavné dětské hračky [online]. Vydáno: 3.8.2015 [Cit. 5.12.2017] Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/co-je-dron-historie-dronu>
- [3] Dron má letos narozeniny [online]. Vydáno: 19.8.2016. [Cit. 5.12.2017] Dostupné z: <http://www.drony-kamery.cz/2016/08/19/dron-ma-letos-narozneniny/>
- [4] Kettering Bug [online]. Vydáno: 11.11.2017. [Cit. 5.12.2017] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Kettering_Bug#/media/File:Kettering-bug-1.jpeg
- [5] Amazon zveřejnil detaily o doručování pomocí dronů [online]. Vydáno: 23.2.2016 [Cit. 5.12.2017] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Kettering_Bug#/media/File:Kettering-bug-1.jpeg
- [6] Priebehy prúdov a napätí v obvode elektropohonu [online]. Vydáno: 4.12.2016 [Cit. 3.4.2018] Dostupné z: <http://rmodely.cevaro.sk/index.php?id=122&n=priebehy-prudov-a-napati-v-obvode-elektropohonu>
- [7] Rozdíl mezi ABS,PLA, PETG [online]. Vydáno: 20.7.2017 [Cit. 14.2.2018] Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>

6 Přílohy

- Příloha č.1 Tabulka vzletové hmotnosti bezpilotního letadla v Doplnku X.
- Příloha č.2 Naměřené hodnoty parametrů u ostatních motorů a vrtulí:
- Příloha č.3 Schéma zapojení řídicí jednoty převzaté z manuálu k DJI NAZA M Lite.

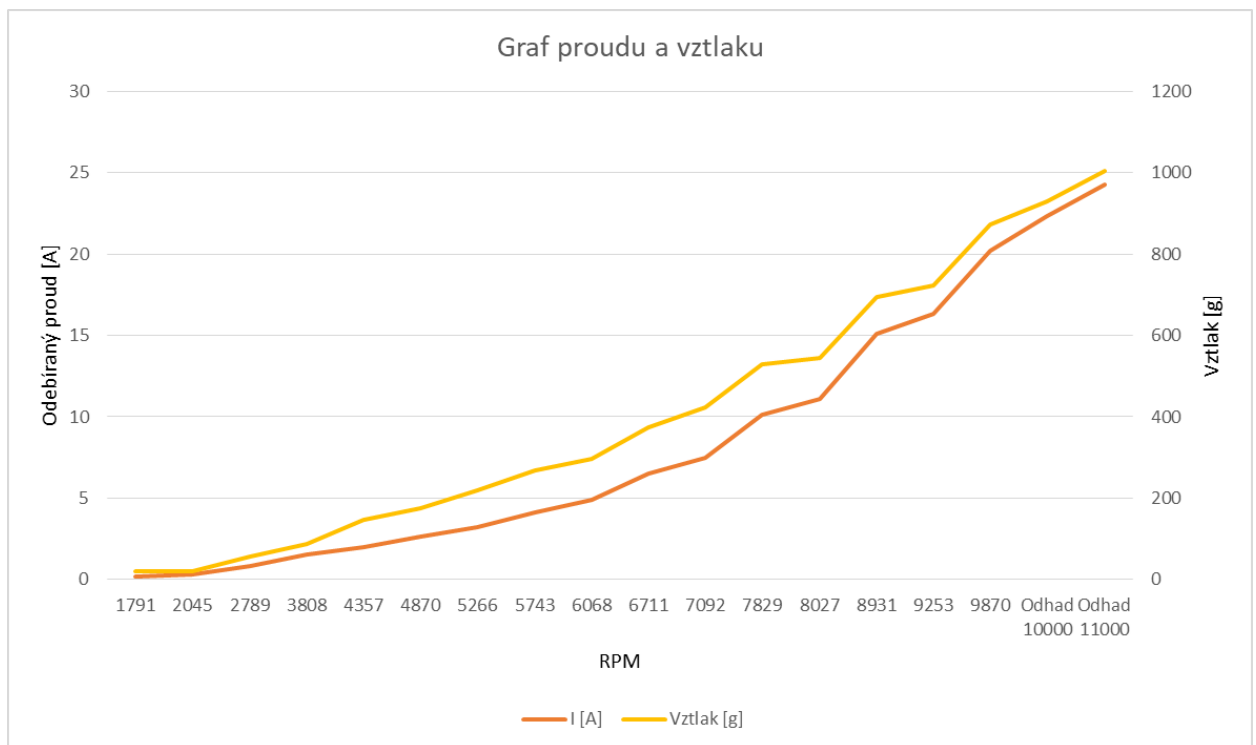
Příloha č.1

Tabulka 1 (viz ust. 16)										
ř.	maximální vzletová hmotnost	≤ 0,91 kg		> 0,91 kg a < 7 kg		7 – 20 kg		> 20 kg		bezpilotní letadlo provozované mimo dohled pilota
-	účel použití požadavek	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	
1	evidence letadla	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
2	evidence pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
3	praktický a teoretický test pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
4	povolení k létání	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
5	povolení k provádění LP a LCPVP	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze
6	označení UA: ID štítek / ID štítek + pozn. značka	ne / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ano
7	min. ve vzdálenosti (m): vzlet, přistání / osoby, stavby / osídlený prostor	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150
8	pojištění: běžný provoz / LVV (mil. Kč)	ne / 0,25	dle nař. č. 785/2004 ¹	ne / 1	dle nař. č. 785/2004 ¹	ne / 3	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹
9	dozor	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ne
10	„failsafe“ systém	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
11	provozní příručka UAS	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne
12	hlášení událostí	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano

Příloha č.2

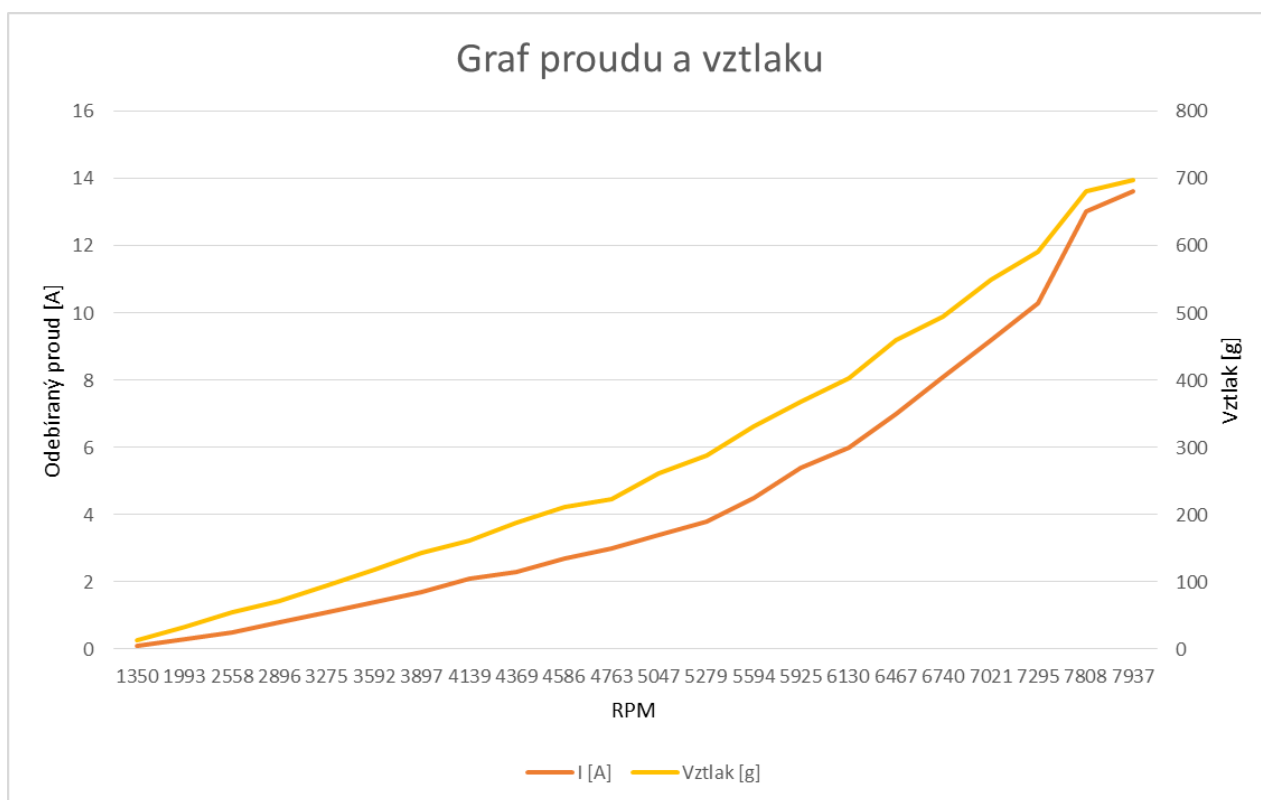
Motor 2216 Vrtule 9045P

RPM	I [A]	U [V]	Vztlak [g]
1791	0,2	11,97	21
2045	0,3	11,97	21
2789	0,8	11,97	56
3808	1,5	11,97	87
4357	2	11,96	146
4870	2,6	11,96	176
5266	3,2	11,94	220
5743	4,1	11,94	269
6068	4,9	11,91	295
6711	6,5	11,89	375
7092	7,5	11,88	422
7829	10,1	11,84	529
8027	11,1	11,81	545
8931	15,1	11,74	693
9253	16,3	11,69	723
9870	20,2	11,64	873
Odhad 10000	22,3	11,62	929
Odhad 11000	24,3	11,6	1004



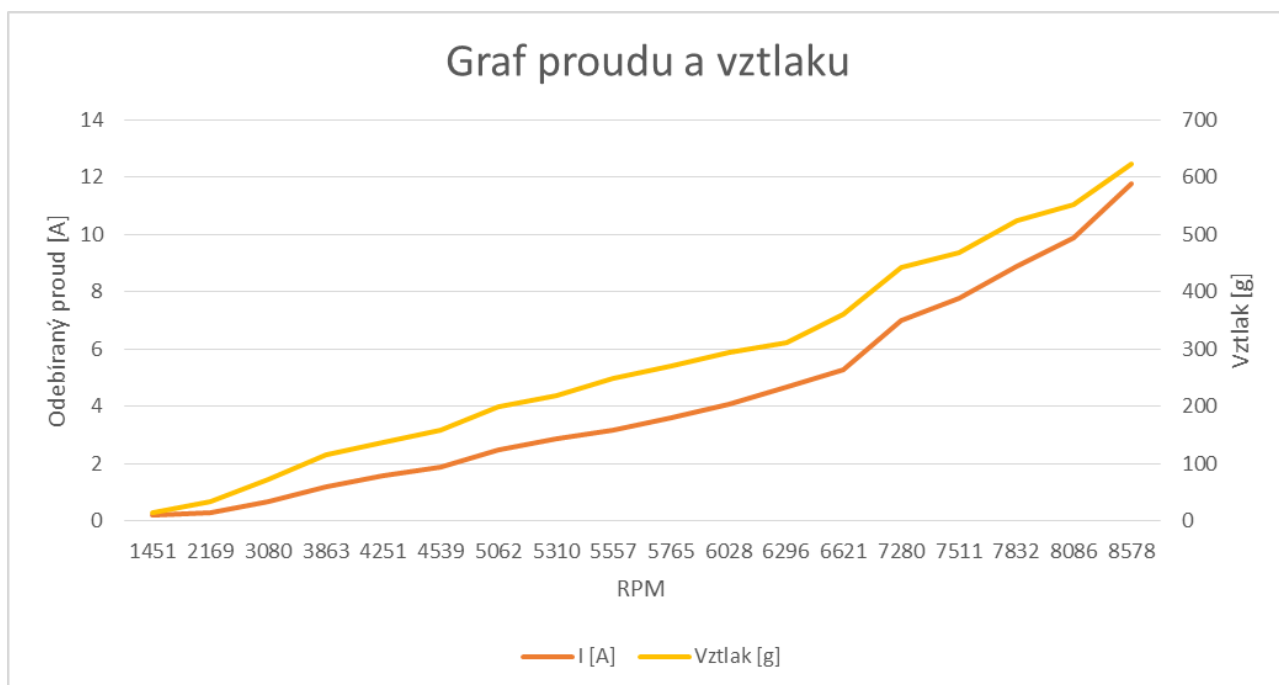
Motor 2212 1000KV Vrtule 1045P

RPM	I [A]	U [V]	Vztlak [g]
1350	0,1	11,89	13
1993	0,3	11,89	33
2558	0,5	11,89	54
2896	0,8	11,88	71
3275	1,1	11,88	94
3592	1,4	11,88	118
3897	1,7	11,88	142
4139	2,1	11,88	161
4369	2,3	11,86	188
4586	2,7	11,85	211
4763	3	11,85	222
5047	3,4	11,85	261
5279	3,8	11,85	288
5594	4,5	11,82	331
5925	5,4	11,82	368
6130	6	11,8	403
6467	7	11,79	459
6740	8,1	11,78	495
7021	9,2	11,75	550
7295	10,3	11,73	591
7808	13	11,69	681
7937	13,6	11,67	698



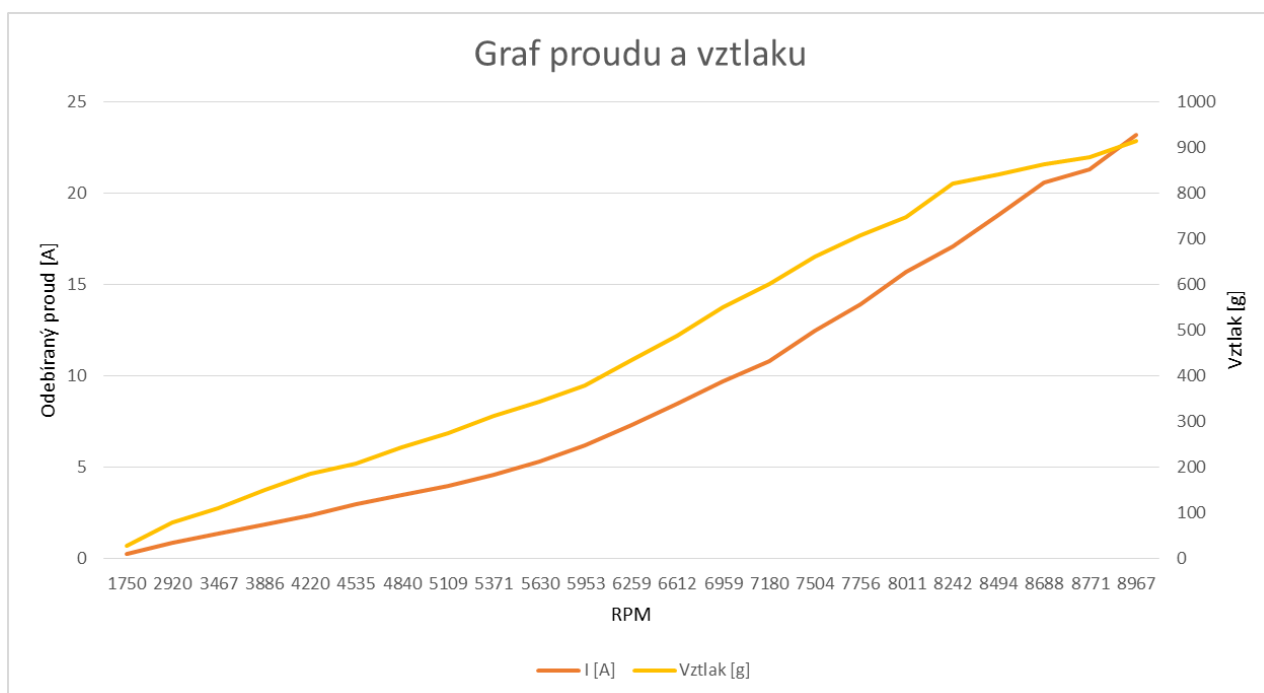
Motor 2212 1000KV Vrtule 9045P

RPM	I [A]	U [V]	Vztlak [g]
1451	0,2	11,84	14
2169	0,3	11,84	34
3080	0,7	11,84	72
3863	1,2	11,84	115
4251	1,6	11,84	138
4539	1,9	11,84	159
5062	2,5	11,83	199
5310	2,9	11,8	220
5557	3,2	11,8	249
5765	3,6	11,8	270
6028	4,1	11,8	294
6296	4,7	11,79	311
6621	5,3	11,77	362
7280	7	11,75	442
7511	7,8	11,74	468
7832	8,9	11,72	525
8086	9,9	11,7	552
8578	11,8	11,66	623



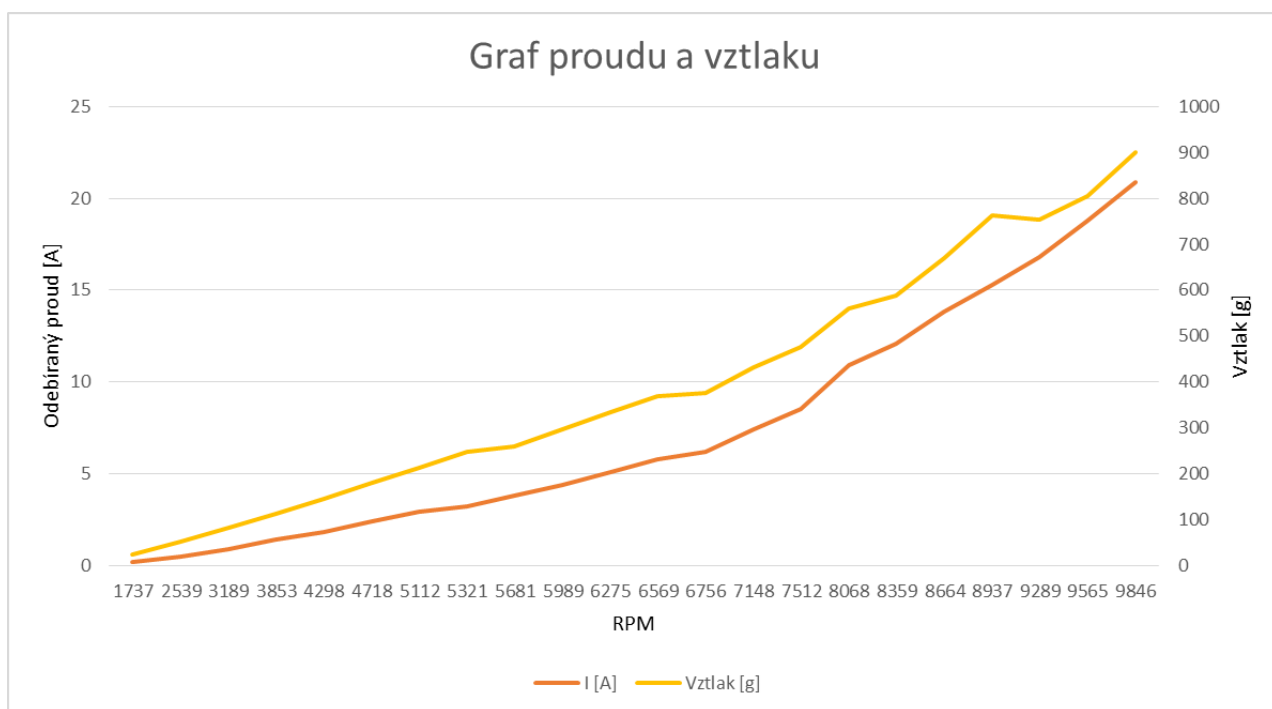
Motor 2212 1400KV Vrtule 1045P

RPM	I [A]	U [V]	Vztlak [g]
1750	0,3	11,81	28
2920	0,9	11,81	80
3467	1,4	11,81	110
3886	1,9	11,81	150
4220	2,4	11,81	186
4535	3	11,78	209
4840	3,5	11,78	245
5109	4	11,78	276
5371	4,6	11,75	314
5630	5,3	11,74	343
5953	6,2	11,73	379
6259	7,3	11,71	436
6612	8,5	11,68	488
6959	9,7	11,67	551
7180	10,8	11,65	602
7504	12,5	11,62	662
7756	13,9	11,6	709
8011	15,7	11,56	749
8242	17,1	11,54	822
8494	18,8	11,52	841
8688	20,6	11,5	863
8771	21,3	11,43	879
8967	23,2	11,43	915



Motor 2212 1400KV Vrtule 9045P

RPM	I [A]	U [V]	Vztlak [g]
1737	0,2	11,69	23
2539	0,5	11,69	51
3189	0,9	11,69	81
3853	1,4	11,69	113
4298	1,8	11,68	146
4718	2,4	11,69	179
5112	2,9	11,65	213
5321	3,2	11,65	248
5681	3,8	11,65	260
5989	4,4	11,64	297
6275	5,1	11,62	333
6569	5,8	11,62	368
6756	6,2	11,59	375
7148	7,4	11,59	431
7512	8,5	11,59	475
8068	10,9	11,52	559
8359	12,1	11,52	589
8664	13,8	11,48	669
8937	15,3	11,47	762
9289	16,8	11,4	753
9565	18,8	11,42	806
9846	20,9	11,37	900



Příloha č.3

