

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Létající prostředek pro IZS

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin MÁLEK**

Osobní číslo: **E15N0069P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**

Název tématu: **Létající prostředek pro IZS**

Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhnete řešení létajícího prostředku vhodného pro nasazení v Integrovaném Záchranném Systému.

1. Zvolte vhodné konstrukční řešení.
2. Navrhnete řídicí elektroniku včetně napájení.
3. Navrhnete vhodný způsob řízení létajícího prostředku.
4. Navržené řešení realizujte.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

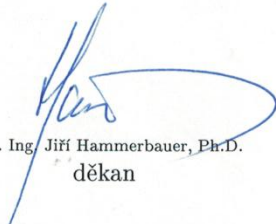
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Weissar, Ph.D.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na stavbu létajícího prostředku vhodného pro nasazení v integrovaném záchranném systému. Létající prostředek vznikl ve spolupráci se společností AEROVISION k.s. Cílem projektu je sestavení dronu, který by byl schopen letu po dobu 45 až 60 minut. Součástí tohoto projektu je návrh vhodného konstrukčního řešení, navrhnutí řídicího a napájecího systému, a také realizace. Zadaného cíle nebylo dosaženo, důvodem je použití méně vhodných konstrukčních materiálů. Celková hmotnost dronu je vyšší než, jaká je navrhovaná. Dalším důvodem je použití vrtulí, které neměly předpokládané parametry. Při návrhu a realizaci byly získány důležité zkušenosti pro návrh elektroniky a mechanické konstrukce pro další verze dronu.

Klíčová slova

Integrovaný záchranný systém, dron, létající prostředek, DJI WOOKONG, DJI A2, PIXHAWK, ORBIS ONE, multikoptéra

Abstract

The master thesis presents the construction of a flying device suitable for deployment in an integrated rescue system. The aircraft was developed in cooperation with AEROVISION k.s. The aim of the project is to build a drone, capable of flying for 45 to 60 minutes. Part of this project is the design of a suitable design solution, design of a control and power system and implementation. The aim was not reached, the reason is the use of less suitable construction materials. The total weight of the drone is higher than that proposed. Another reason is the use of propellers that did not have the expected parameters. During design and implementation, important experience has been gained in designing electronics and mechanical design for other drone versions.

Key words

Integrated rescue system, drone, flying device, DJI WOOKONG, DJI A2, PIXHAWK, ORBIS ONE, multicopter

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 17.5.2017

Bc. Martin Málek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Weissarovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych chtěl poděkovat vedení společnosti AEROVISION k.s. za možnost použít projekt dronu ORBIS jako moji diplomovou práci.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
OBEČNĚ O DRONECH	12
1.1 ZÁKLADNÍ DEFINICE DRONU.....	12
1.2 KLASIFIKACE BEZPILOTNÍCH LETADEL A BEZPILOTNÍHO SYSTÉMU DLE UCL.....	12
1.3 HISTORIE BEZPILOTNÍCH SYSTÉMŮ.....	13
1.4 KONSTRUKCE.....	15
1.4.1 Základní rozdělení konstrukcí.....	15
1.4.2 Konstrukční materiály.....	16
1.4.3 Umístění elektroniky.....	17
1.4.4 Přídavné zařízení.....	18
1.4.5 Ochranné prvky.....	20
1.5 PRINCIP LETU.....	21
1.6 MOTORY.....	23
1.6.1 Stejnsměrné elektromotory.....	23
1.6.2 Střídavé elektromotory.....	24
1.7 VRTULE.....	25
1.8 ELEKTRONIKA.....	26
1.8.1 Řídící jednotka.....	27
1.8.2 Senzory.....	28
1.8.3 Záznam letových dat.....	37
1.8.4 Ovládání stroje.....	38
1.8.5 Regulátory otáček.....	40
1.8.7 Napájecí elektronika.....	41
1.8.8 Gimbal.....	42
1.8.9 FPV kamera a přenos video signálu.....	42
1.8.10 Podvozek.....	44
1.9 BATERIE.....	45
2 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY	47
2.1 BEZPEČNOST A SPOLEHLIVOST.....	48
2.2 DOBA LETU.....	48
2.3 PŘÍDAVNÁ ZAŘÍZENÍ.....	49
3 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ	50
3.1 ZÁKLADNÍ KONCEPT.....	51
3.2 NOSNÁ KONSTRUKCE.....	51
3.3 PODVOZEK.....	52
3.4 OCHRANNÝ KRYT.....	53
4 POHON	55
4.1 MOTORY.....	55
4.2 REGULÁTORY.....	57
4.3 VRTULE.....	58
5 NAPÁJENÍ	59
5.1 BATERIE.....	59
5.2 NAPÁJECÍ ELEKTRONIKA.....	64
5.3 NABÍJEČ.....	66

6	ŘÍDÍCÍ ELEKTRONIKA.....	68
6.1	DJI WOOKONG	68
6.2	DJI A2.....	69
6.3	PIXHAWK	69
7	ŘÍZENÍ.....	71
8	REALIZACE	72
8.1	NOSNÁ KONSTRUKCE	72
8.2	OCHRANNÝ KRYT	73
8.3	POSTUP SESTAVENÍ.....	73
8.4	POSTUP OŽIVENÍ.....	74
8.5	OBRÁZKY REALIZACE.....	74
	ZÁVĚR.....	78
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	80
	PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UA	Unmanned Aerial
UAS	Unmanned Aerial System
GPS.....	The Global Positioning System
BLDC	Brushless direct current motor
PITCH.....	Náklon okolo osy Y dronu
ROLL.....	Náklon okolo osy X dronu
YAW.....	Náklon okolo osy Z dronu
PWM.....	Pulse Width Modulation
IMU	Inertial Measurement Unit
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
I ² C.....	Inter Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
SMD	Surface Mount Device
PCM.....	Pulse Code Modulation
RC.....	Remote Control
S.BUS	Komunikační sběrnice vyvinutá firmou FUTABA
FPV.....	First Person View
CCCV	Constant Current Followed Constant Voltage
IZS	Integrovaný záchranný systém
LED	Light Emitting Diode
LTE.....	Long Term Evolution
CNC.....	Computer Numerical Control

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na stavbu létajícího prostředku, který by byl vhodný pro nasazení v integrovaném záchranném systému.

Na projektu tohoto létajícího prostředku jsem se podílel ve společnosti AEROVISION k.s. Projekt je nazvaný jako ORBIS ONE. Hlavním cílem tohoto projektu je sestrojení dronu, který by byl schopen 45 až 60 minutového letu.

Práce je rozdělena do osmi hlavních částí. První část je zaměřena na teorii týkající se dronů, principy letu a elektroniku. V druhé části jsou blíže specifikovány požadavky, které musí splňovat dron pro nasazení v IZS. Další části se zabývají návrhem konstrukce, napájení a řídicí elektroniky, ovládání a realizací projektu.

Obecně o dronech

1.1 Základní definice dronu

Dron je bezpilotní letoun, který může být řízen na dálku, nebo létat samostatně pomocí předprogramovaných letových plánů. Případně může dron obsahovat autonomní řídicí systém. Někdy je dron označován jako UAV. Bzpilotní letadla mohou být použita k armádním i civilním účelům.

1.2 Klasifikace bezpilotních letadel a bezpilotního systému dle UCL

Bezpilotní letadlo (UA) je letadlo určené k provozu bez pilota na palubě (může se jednat a většinou se jedná o součást bezpilotního systému). V kontextu legislativního rámce České republiky se za bezpilotní letadla považují všechna bezpilotní letadla s výjimkou modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 20 kg. [1]

Bezpilotní systém (UAS) je systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat. Bzpilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více. [1]

Model letadla je letadlo, které není schopné nést člověka na palubě, je používán pro soutěžní, sportovní nebo rekreační účely, není vybaveno žádným zařízením umožňujícím automatický let na zvolené místo, a které, v případě volného modelu, není dálkově řízeno jinak, než za účelem ukončení letu nebo které, v případě dálkově řízeného modelu, je po celou dobu letu pomocí vysílače přímo řízené pilotem v jeho vizuálním dohledu. [1]

1.3 Historie bezpilotních systémů

První bezpilotní letadla byla používána od roku 1916 převážně pro vojenské účely. Jednalo se především o vzdušné cíle, nebo o nosiče bomb. Jedním z prvních nosičů bomb byl Kettering bug (obr. 1.3.1). Tyto letouny byly ovládány pomocí rádía a gyroskopů. [2]



Obr. 1.3.1 Kettering bug [2]

Velkého pokroku při vývoji bezpilotních systémů bylo dosaženo v průběhu studené války a války ve Vietnamu. Bepilotní letouny byly využívány pro pořizování fotografií, nebo shazování letáků. Pro přistání na zem měly některé stroje podvozek, případně padák, díky kterému bylo možné opětovné použití. [3]

Od 80. let byly bezpilotní letouny používány také k ničení nepřátelských cílů a rušení rádiové komunikace. Dalším využitím dronů bylo označování cílů pro naváděné rakety. Takovéto použití velmi snížilo náklady a rizika spojená s pilotovaným letem na nepřátelské území. Jedním z prvních dronů používaných pro takovéto úkoly je Pioneer RQ-2A (obr. 1.3.2). S pokračujícím vývojem došlo také k použití menších dronů určených pro pěchotu, které mohou být odstartovány hozením z ruky. [4]



Obr. 1.3.2 Pioneer RQ-2A [5]

V současné době jsou drony používány také pro civilní účely. Jedním z využití jsou letecké práce, rekreační a soutěžní účely. Nejčastěji jsou používány drony na principu vrtulníku, které mají 4 až 8 rotorů.

Pro letecké práce jsou ve většině případů používány multikoptéry s 6 a 8 rotory, vybavené kamerou, termokamerou, nebo fotoaparátem. Větší počet rotorů umožňuje nést větší zátěž, zvyšuje stabilitu letu při zhoršených povětrnostních podmínkách, vzletu a přistání.

K rekreačním účelům jsou nejčastěji používány multikoptéry s 4 a 6 rotory. Na tyto multikoptéry nejsou kladeny tak vysoké nároky na nosnost přídavného zařízení. Ve většině případů je na multikoptéru přidána outdoorová kamera. Kamera bývá umístěna na gimbalu (viz. kap. 1.4.4), který stabilizuje kameru vůči pohybům multikoptéry a zvyšuje kvalitu natočeného záznamu.

Závodní multikoptéry mívají nejčastěji pouze 4 rotory. Jsou vybaveny malou a lehkou kamerou. Obraz je přenášen v reálném čase do pilotových brýlí, aby mohl pilot dostatečně

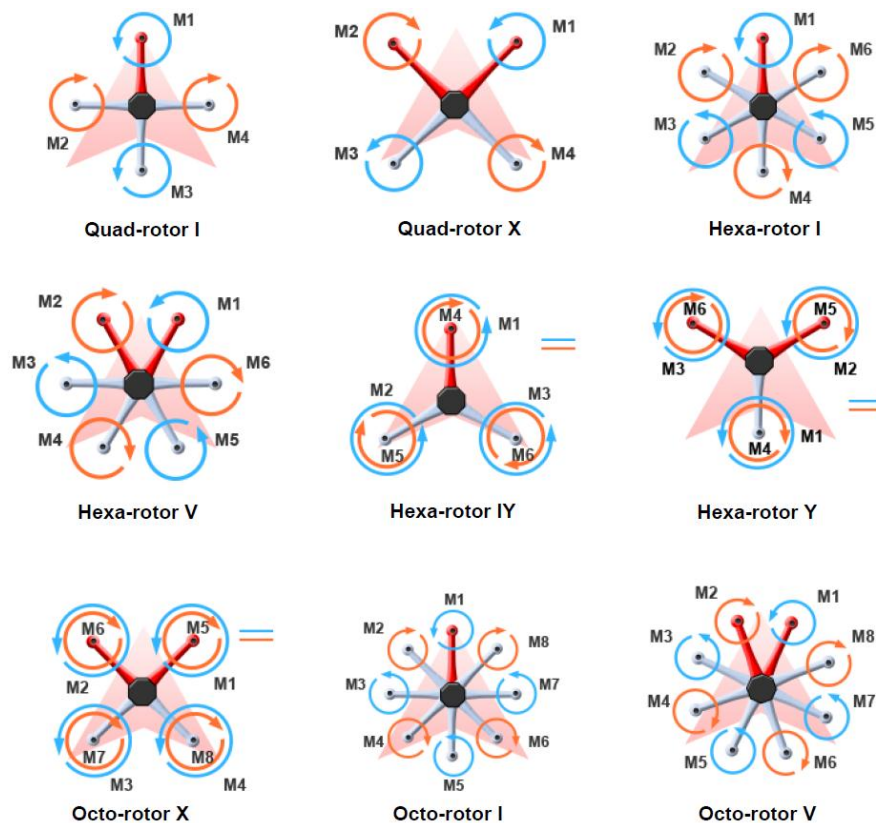
rychle reagovat na pohyby multikoptéry při vysoké rychlosti. Tyto multikoptéry dosahují rychlosti až 150km/h.

1.4 Konstrukce

Na rozdíl od letadel s pevným křídlem nejsou na trup multikoptér kladeny tak vysoké nároky na aerodynamické vlastnosti. Trup slouží k upevnění motorů, řídicí elektroniky, baterií a dalšího přídavného zařízení. Mechanická konstrukce musí být dostatečně odolná, aby byla schopna odolat mechanickému namáhání, které vzniká při vzletu, přistání a samotném letu. Dále musí být trup dostatečně tuhý, aby během letu nedocházelo k jeho rozkmitání.

1.4.1 Základní rozdělení konstrukcí

Základní rozdělení multikoptér vychází z počtu rotorů, jak je ukázáno na *Obr. 1.4.1.1*. Nejčastěji je používané řešení se čtyřmi až osmi rotory. Počet ramen, na kterých jsou umístěny rotory, se liší podle daného konstrukčního řešení. Na jednom rameni může být umístěn jeden, nebo dva rotory. Použití dvou rotorů na jednom rameni je výhodné z hlediska snížení celkové hmotnosti trupu multikoptéry.



Obr. 1.4.1.1 Základní rozdělení multikoptér podle počtu a umístění rotorů [6]

1.4.2 Konstrukční materiály

Trup multikoptéry je možné vytvořit z mnoha různých typů materiálů. Materiály a jejich kombinace je volena dle požadovaných vlastností multikoptéry.

Pro sériovou výrobu multikoptér menších rozměrů je nejvýhodnější použití lisovaných plastů, které jsou dostatečně lehké a levné. Značnou nevýhodou je jejich křehkost a špatná opravitelnost po pádu.

Multikoptéry s kvalitnější konstrukcí využívají kombinaci kompozitních materiálů, jako je například karbon a duralových profilů. Tyto materiály mají dostatečnou odolnost při zachování nízké hmotnosti. Nevýhodou těchto materiálů vysoká pořizovací cena. Jednotlivé díly musí být vyrobeny pomocí počítačově řízených obráběcích strojů speciálně pro daný typ multikoptéry.

Ve speciálních případech je využíváno laminování, především jedná-li se o velmi specifickou konstrukci trupu. Jako nosný materiál se nejčastěji používají skelná, nebo karbonová vlákna a jako pojivo pryskyřice. Laminováním jsou vyráběny také kryty elektroniky. Díly vytvořené pomocí laminování je vhodné použít vzhledem k jejich nízké hmotnosti.

Multikoptéru je možné vytvořit pomocí 3D tiskárny. Jednotlivé díly je možné snadno upravovat pro dané potřeby a snadno vytisknout znovu v případě zničení původního dílu. 3D tisk je často používán při opravách a vývoji nových dílů, lze tak snadno a levně vytvořit díly, jejichž kusová výroba lisováním plastů by byla velmi nákladná.

1.4.3 Umístění elektroniky

Ve většině konstrukcí bývají elektronické komponenty umístěny na dobře chráněných, nebo naopak na dobře přístupných místech. Baterie zabírá velký prostor, a proto bývá u větších strojů umístěna nad nebo pod středovou částí, ke které jsou uchycena ramena. U menších strojů, bývá baterie zabudovaná uvnitř trupu ve speciálním loži tak, aby ji bylo možné snadno a rychle vyměnit.

Řídící elektronika bývá z pravidla umístěna na dobře chráněném místě, v případě pádu stroje by její zničení znamenalo velikou finanční ztrátu v porovnání s ostatními komponenty. Nejbezpečnější část stroje je pro řídicí elektroniku středová část trupu, ke kterému jsou uchycena ramena. Tato středová část bývá u větších strojů vyrobena z karbonových desek, které mají vysokou pevnost. Umístění řídicí elektroniky do středové části je také používáno u závodních dronů, u kterých dochází k nárazům při vysoké rychlosti.

Zařízení pro určování polohy stroje využívající systém GPS je umístěno na nevyšším místě trupu. Toto umístění je nutné, aby nedocházelo ke stínění signálu potřebného pro fungování tohoto zařízení některou z komponent stroje. GPS senzor bývá umístěn na karbonové, nebo duralové trubičce, která je připevněna ke středové části, nebo k některému z ramen. Toto umístění je nevýhodné z důvodu nízké ochrany GPS senzoru, zejména při pádu stroje a jeho následném převrácení.

Regulátory otáček motorů bývají umístěny samostatně buď v rameni, nebo na jeho povrchu. Další možné umístění je ve středové části, nebo přímo pod motorem. Volba umístění regulátoru závisí na velikosti regulátoru a nutnosti chlazení.

Pro snadnější orientaci pilota bývají konce ramen vybaveny orientačními světly. Tyto světla signalizují především polohu přední či zadní části stroje. Dále je možné pomocí orientačních světel signalizovat stav stroje. Například změnu pilotního módu, nebo poruchu na některém z regulátorů. V případech, kdy řídicí jednotka neumožňuje připojení několika orientačních světel, pomocí nichž by bylo možné informovat pilota o stavu stroje je použito pouze jedno signalizační světlo, které je umístěno na dobře viditelném místě.

Obvyklé umístění samostatného signalizačního světla bývá středová část trupu, případně zadní rameno stroje.

1.4.4 Přídavné zařízení

Plně vybavený trup dronu je použit, jako nosič přídavného zařízení. Zařízení, které je na trup přidáváno slouží k vykonávání práce, která je požadována. Velikost dronu je volena podle zařízení, které se na trup přidává, a také podle požadované doby letu. Drony používané pro letecké práce jsou obvykle řízeny pomocí dvoučlenného týmu. Pilot má na starosti let stroje. Ke zlepšení jeho orientace slouží menší kamera umístěná pevně na středové části dronu. Obraz z této kamery je přenášěn v reálném čase do obrazovky pilota. Do přenášeného obrazu z kamery jsou přidány telemetrické údaje. Operátor ovládá přídavné zařízení umístěné na trupu, které může být napájeno z palubní sítě dronu a řízeno pomocí hlavního přijímače, nebo je od palubní sítě odděleno a používá samostatnou baterii a přijímač. Použití samostatného napájení je výhodné, pokud je zapotřebí zařízením volně otáčet. Nedochozí tak k překroucení propojovacích kabelů mezi přídavným zařízením a trupem dronu.

Nejčastějším zařízením, které se na trup přidává, jsou kamery a fotoaparáty. Na trup může být přidáno i jiné zařízení, například laserový radar pro mapování terénu. Pro co nejvyšší kvalitu záznamu z kamery, nebo fotoaparátu je nutná stabilizace obrazu. Zařízení, které je nutné stabilizovat, je připevněno do speciálně navrženého stabilizátoru, který se nazývá gimbal.

Gimbal je zařízení, které slouží pro stabilizaci náklonu a redukci nechtěných otřesů. Otřesy jsou redukovány pomocí silentbloků vyrobených z měkké gumy a umístěných mezi základnou gimbalu a jeho uchycovací částí. Gimbal dále tvoří řídicí elektronika a několik motorů, přičemž každý motor vyrovnává náklon v jedné ose. Počet motorů je u různých typů gimbalů odlišný a závisí na počtu os, které gimbal stabilizuje. Data o náklonu jsou do řídicí jednotky přenášena z gyroskopu umístěného na stabilizované podložce, ke které je připevněna kamera, nebo fotoaparát. Příklad tříosého gimbalu, který stabilizuje náklon malé kamery je na *Obr. 1.4.4.1*.



Obr. 1.4.4.1 Tříosý gimbal s kamerou [7]

Automatické nastavení gimbálu do vodorovné polohy je prováděno při každém zapnutí napájení. Z tohoto důvodu musí být stroj vždy před startem umístěn na vodorovnou podložku a poté je možné stroj zapnout. Gimbal udržuje po celou dobu letu vodorovný náklon kamery, na který byl kalibrován před startem. Natočení gimbálu vzhledem k přední části stroje a svislý náklon kamery je možné měnit pomocí povelů od vysílačky.

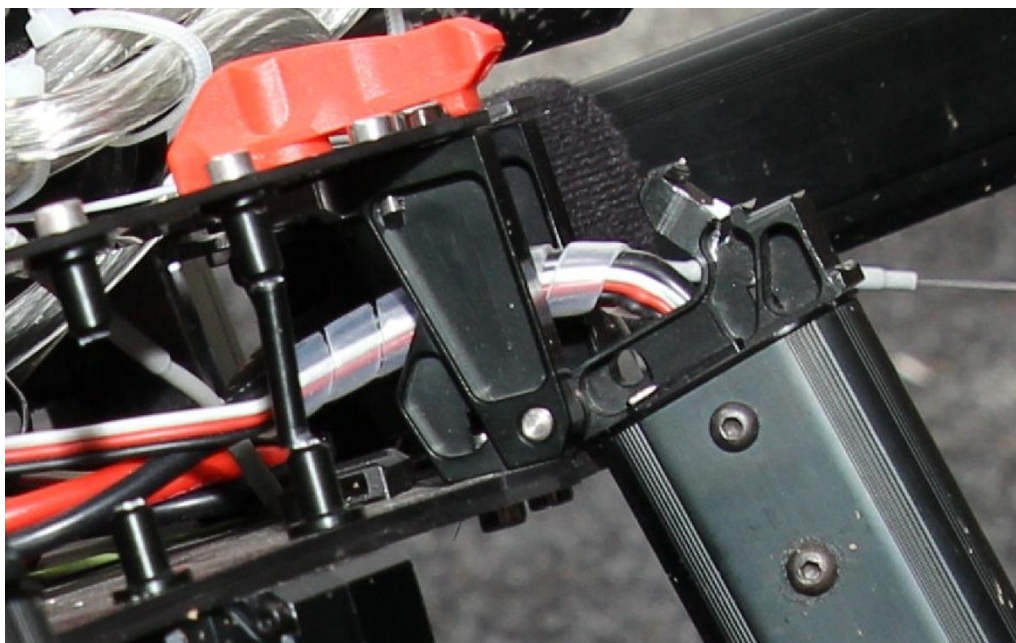
Starší druhy gimbálů používají pro stabilizaci servomotory, které jsou připojeny přímo do řídicí jednotky dronu. Nevýhodou servomotorů je jejich pomalá doba přestavení do jiné polohy. Novější gimbaly jsou vybaveny BLDC motory, které nejsou vybaveny dalšími převody, jako servomotory. Mechanismus jednotlivých ramen je spojen přímo s rotorem těchto motorů. Náklon je řízen pomocí magnetického pole uvnitř motorů. Použití těchto motorů je výhodné zejména v aplikacích, kde je zapotřebí velmi rychlá stabilizace.

1.4.5 Ochranné prvky

Hlavním cílem těchto prvků je snížení ničivých účinků při pádu. V průběhu každého letu dronu vzniká nebezpečí pádu. Příčinou může být porucha řídicí elektroniky, výpadek motorů, vybití akumulátorů, a také srážka s jiným objektem. Pokud dojde k pádu, jsou na trupu umístěny speciálně navržené prvky, které slouží ke zmírnění ničivých účinků.

Jako základní ochrana proti pádu jsou použity kryty vrtulí, které zabraňují vniknutí cizího předmětu do prostoru vrtule. U multikoptér s větším počtem rotorů nemusí po zničení jedné vrtule dojít k pádu. Pokud řídicí jednotka rozpozná zničení jedné vrtule, může být schopna vypnout motor na protější straně a dron může bezpečně přistát se zbývajícím počtem vrtulí, aniž by došlo k pádu.

V případě, že pádu nelze nijak zabránit je možné zmírnit jeho ničivé účinky speciálně navrženými konstrukčními prvky. Na *Obr. 1.4.3.1* je část ochranných konstrukčních prvků zobrazena. Jedná se například o speciální distanční sloupky, které se při pádu zlomí. Dalším ochranným prvkem je zeslabení zámku ramene, který drží rameno ve správné poloze pro let. Při pádu se tento zámek odlomí a dojde k uvolnění ramene, aby došlo k minimálnímu poškození středové části trupu.



Obr. 1.4.3.1 Ukázka zničených konstrukčních prvků po pádu multikoptéry

Další ochranu dronů proti nekontrolovatelnému pádu tvoří padáky. K aktivaci padáku dojde v případě, že řídicí jednotka není schopna ovládat let a dron začíná padat. Použití padáku může při pádu zachránit většinu vybavení a následná oprava není tak rozsáhlá a nákladná, jako při pádu bez padáku.

1.5 Princip letu

Na rozdíl od letadla nebo vrtulníku neobsahuje konstrukce multikoptéry takové množství složitých pohyblivých prvků a mechanismů. Vztlak je vytvářen pomocí několika vrtulí. Každý motor je spojen s jednou vrtulí, tak lze regulovat vztlak každé vrtule. Díky tomuto zjednodušení mechanické konstrukce došlo k nárůstu požadavků na funkce řídicí elektroniky, která ovládá jednotlivé motory. Pro správný let stroje je nutné, aby řídicí jednotka prováděla nepřetržitě korekce na základě získaných dat. Rychlost otáčení jednotlivých motorů je určena na základě získaných dat ze senzorů a příkazů pilota.

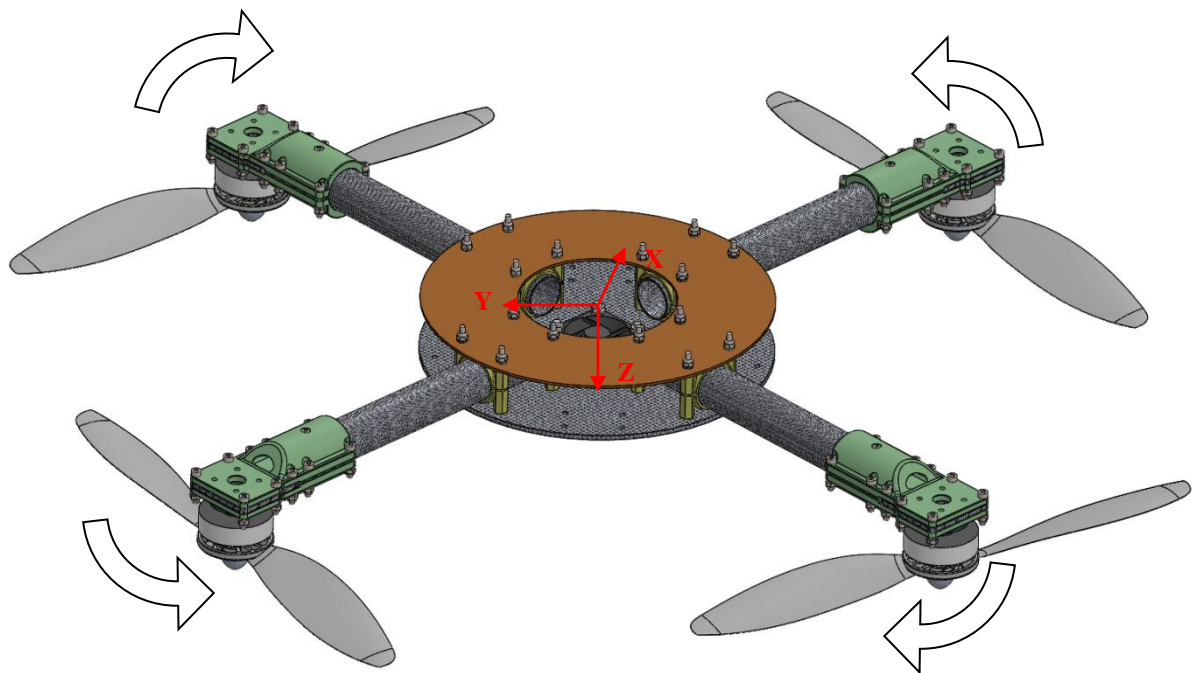
Pro vysvětlení principu letu je nejvhodnější kvadrokoptéra. Tento typ dronu má nejjednodušší konstrukci, a také je nejvíce rozšířený. Kvadrokoptéra má 6 stupňů volnosti, tj. posuv ve třech osách, a také rotace okolo tří os. Rotace jednotlivých vrtulí je znázorněna na *Obr. 1.5.1*. Kvůli vyrovnaní jednotlivých momentů je nutné, aby se polovina vrtulí otáčela opačným směrem. Na dronu mají vždy dvě sousední vrtule opačný smysl otáčení. Z tohoto důvodu jsou na dronu umístěny dva typy vrtulí, které vytváří vztlak stejným směrem i při různém smyslu otáčení.

Každý pohyb dronu je výsledkem změny otáček jednotlivých vrtulí. Svislý pohyb dronu je dán zvýšením či snížením otáček všech vrtulí o stejnou hodnotu.

Pro let dopředu či dozadu, musí dojít nejprve k náklonu okolo osy Y. Tento náklon se anglicky označuje jako pitch. Náklonu dosáhneme snížením, nebo zvýšením otáček předního, nebo zadního páru motorů. Rychlost letu dronu je závislá na velikosti náklonu.

Let doprava, nebo doleva je ovládán obdobně, jako pro let dopředu a dozadu. Při tomto letu dochází k náklonu okolo osy X. Tento náklon je označován jako roll.

Posledním pohybem je rotace kolem osy Z. Úhel natočení kolem této osy je označován jako yaw. Aby došlo k rotaci a současně byl zachován celkový tah, je nutná změna otáček u všech motorů. Jedné dvojici shodně se otáčejících vrtulí je snížena rychlost a naopak druhé dvojici je rychlost otáčení zvýšena. Rychlost otáčení podél osy Z je závislá na velikosti změny otáček oproti vyváženému stavu.



Obr. 1.5.1 Ukázka směru rotace vrtulí u kvadrokoptéry

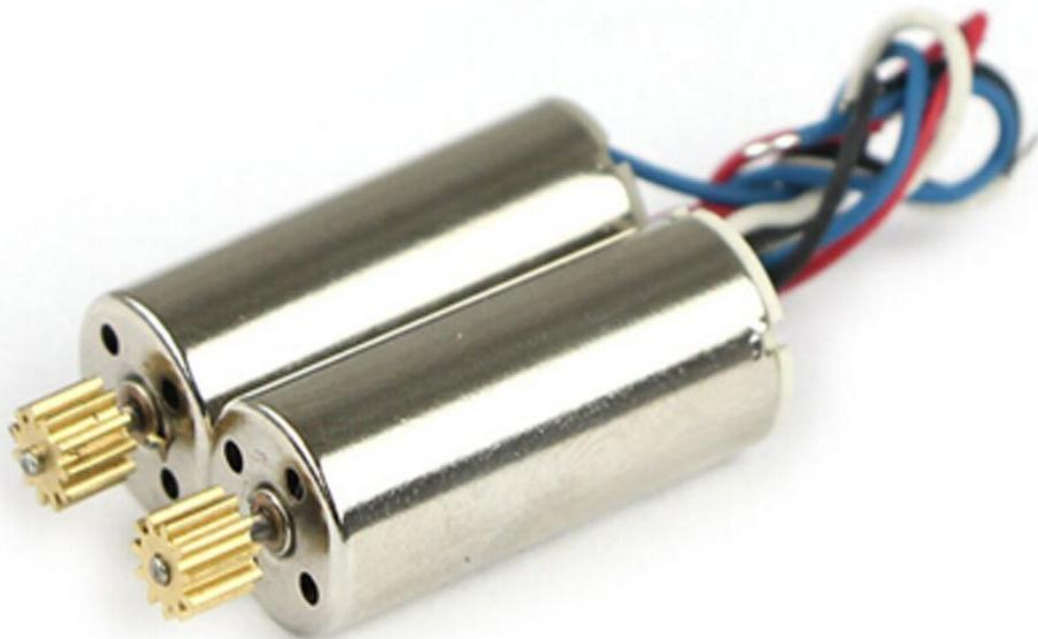
1.6 Motory

Pro pohon jednotlivých vrtulí jsou na multikoptérech používány elektromotory. Benzinové motory nejsou vhodné z důvodu malé dynamiky změn ve výkonu motoru. Elektromotory používané v multikoptérech je možné rozdělit do dvou kategorií na stejnosměrné s komutátorem a střídavé bez komutátoru.

1.6.1 Stejnosměrné elektromotory

Tyto motory jsou nejjednodušším typem elektromotorů. Stator je tvořen permanentními magnety. Rotor je tvořen několika cívkami a komutátorem. Regulace otáček je prováděna pomocí změny napájecího napětí, nebo pomocí PWM modulace, kdy dochází ke změně střední hodnoty protékajícího proudu rotoru. Směr otáčení motoru je možné změnit přepólováním zdroje proudu. U multikoptér není zapotřebí měnit směr otáčení v průběhu letu, proto je vhodná polarita zdroje volena při stavbě stroje.

Stejnosměrné motory jsou pro multikoptéry vhodné z hlediska jednoduchosti řízení. Jejich nevýhodou je nízká efektivita a nutnost údržby. Z těchto důvodů jsou stejnosměrné motory používány především u menších strojů, které jsou určeny pro rekreační účely.



Obr. 1.6.1.1 Stejnosměrné elektromotory [8]

1.6.2 Střídavé elektromotory

Konstrukce střídavých motorů je ukázána na *Obr. 1.6.2.1*. Motory jsou složeny z rotoru, na kterém jsou umístěny permanentní magnety a ze statoru. Na statoru je umístěno vinutí.



Obr. 1.6.2.1 BLDC motor T-MOTOR U8 [9]

Rotor je umístěn vně konstrukce, magnety jsou umístěny na jeho vnitřní straně a jsou k němu připevněny pomocí speciálního lepidla. U takto umístěných magnetů nevzniká riziko odlepení magnetů vlivem odstředivé síly, jako je tomu v případě, že by magnety byly umístěny na vnější straně rotoru. Díky tomuto konstrukčnímu řešení mohou dosahovat motory vysokých otáček, řádově až 10000 ot/min.

Stator je umístěný uvnitř konstrukce motoru. Na statoru je umístěno obvykle tři fázové vinutí zapojené do trojúhelníku, nebo do hvězdy. Na statoru může být umístěno čidlo polohy, ale ve většině případů jím motor vybaven není a regulátor zjišťuje polohu motoru pomocí snímání napětí na jednotlivých fázích vinutí.

Střídavé elektromotory jsou velmi často používány a nahrazují stejnosměrné motory. Velikou výhodou těchto motorů je absence mechanického komutátoru. Díky tomu mají tyto motory delší životnost a neprodukují vysokofrekvenční rušení, které vzniká při jiskření uhlíků na komutátoru. Jediná údržba, která je zapotřebí, je pouze výměna ložisek. Střídavé elektromotory dosahují vyšší účinnosti než stejnosměrné elektromotory a jsou také lehčí.

Nevýhodou oproti stejnosměrným motorům je složitější elektronika regulátoru, která musí zajistit komutaci jednotlivých fází elektronicky. Další nevýhodou představuje již zmiňovaná konstrukce rotoru, který je umístěn na vnější straně motoru. Díky tomuto konstrukčnímu řešení je rotor nechráněn v případě pádu multikoptéry. Ve většině případů, když rotor při pádu narazí na zem, dojde k narušení pláště rotoru. Narušený plášť rotoru může způsobovat nežádoucí vibrace, případně může dojít i ke tření permanentních magnetů a statorových plechů. V každém případě, že stroj při pádu dopadne na motory je narušena jejich životnost a bezchybná funkce, a proto je nutná jejich výměna

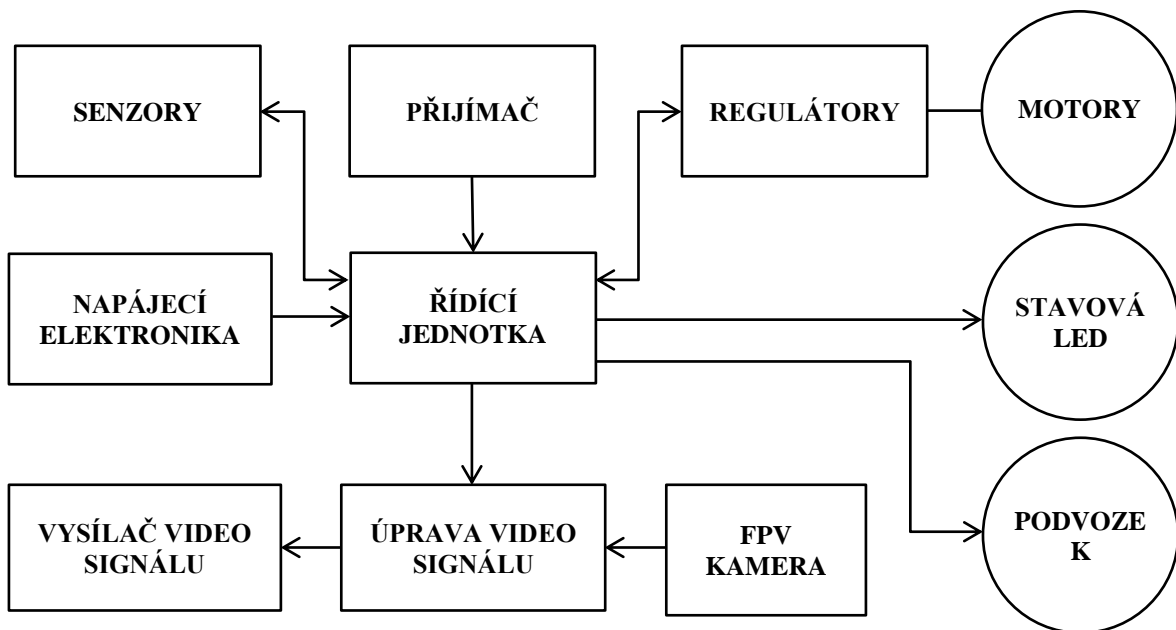
1.7 Vrtule

Vrtule jsou jedním z nejdůležitějších mechanických komponent každé multikoptéry. Důležitými parametry vrtulí je jejich velikost a stoupání. Tyto parametry jsou závislé na otáčkách a výkonu motoru. V případě, že motor dosahuje vysokých otáček, jsou voleny převážně vrtule s menším stoupáním. Tyto vrtule bývají použity pro větší drony, kde je kladen důraz na stabilitu letu. Vyšší stoupání umožňuje velmi rychlé změny tahu, a proto jsou takovéto vrtule používány zejména pro závodní drony. Tvar listu vrtule závisí na druhou motoru, pro který jsou určeny. Vrtule určené pro elektromotory a pro benzinové motory mají různý tvar listů.

Vrtule mohou být vyrobeny z různých druhů materiálů. Pro menší stroje se používají vrtule vyrobené z plastů, naopak na větší stroje se používají vrtule ze dřeva a karbonu.

1.8 Elektronika

Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, let multikoptéry je ovládán pomocí několika motorů. Rychlost otáčení jednotlivých motorů je řízena na základě dat ze senzorů a podle pokynů pilota. Na *Obr. 1.8.1* je znázorněno zjednodušené blokové schéma elektroniky řídicí dron.



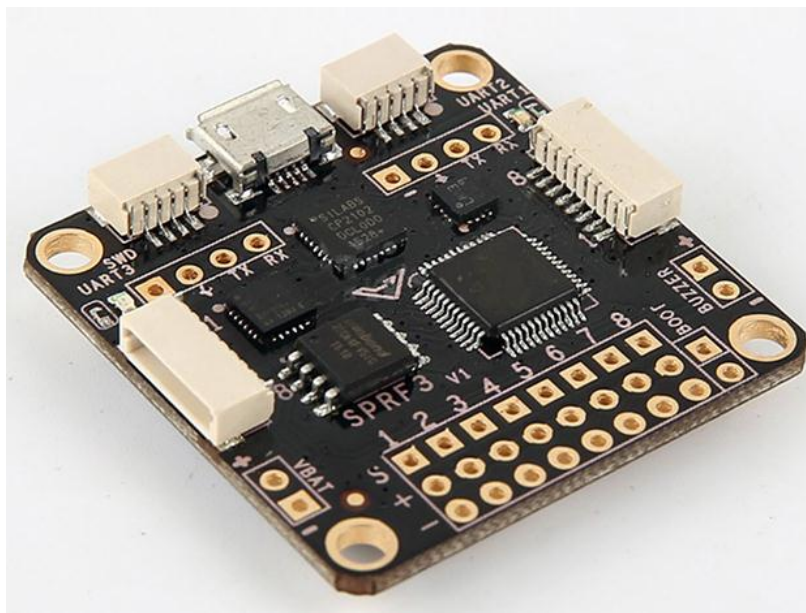
Obr. 1.8.1 Blokové schéma elektroniky multikoptéry

Hlavním blokem je řídicí jednotka, která zpracovává veškeré informace. Nejdůležitějšími informacemi pro správný chod stroje jsou data ze senzorů a přijímače. Přijímač zasílá data o požadavcích pilota a senzory zajišťují zpětnou vazbu o chování stroje. Výstupem z řídicí jednotky jsou informace pro regulátory jednotlivých motorů o rychlosti jejich otáčení. Řídicí jednotka má dále na starosti sledování stavu baterií a předávání informací pilotovi formou světelných signálů pomocí stavové LED. U dronů vybavených kamerou je možné upravit video signál z kamery před jeho vysláním z dronu. Do video signálu jsou přidány telemetrické údaje. Základními údaji, které se přidávají, jsou: napětí baterií, odebraný výkon z baterií, počet satelitů GPS, poloha stroje, náklon, zrychlení a rychlost pohybu v jednotlivých osách stroje, nadmořská výška, doba letu a vzdálenost od místa vzletu.

1.8.1 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka zpracovává veškeré potřebné informace pro správný let multikoptéry. Z tohoto důvodu je nutné, aby řídicí jednotka byla vybavena dostatečně výkonným mikroprocesorem. Výběr mikroprocesoru se odvíjí podle konkrétní aplikace. V řídicích jednotkách jsou často používány procesory ARM a ATmega. Mikroprocesor ATmega je osazen například v řídicí jednotce ArduPilot Mega, která je plně programovatelná a určená pro vývoj softwaru určeného pro řízení bezpilotních letadel.

Součástí řídicí jednotky bývají také senzory, jako je například tříosý kompas, barometr, gyroskop a akcelerometr. Součástí řídicí jednotky může být také přijímač rádiového signálu. Na *Obr. 1.8.1.1* je zobrazena řídicí jednotka, která obsahuje řídicí mikroprocesor a několik senzorů. Výhodou takto umístěných senzorů jsou především nízké prostorové nároky.



Obr. 1.8.1.1 Řídicí jednotka [10]

Umístění senzorů se liší dle výrobce řídicí elektroniky. Velmi často jsou senzory umístěny do speciálního modulu, který se nazývá IMU jednotka. Tato jednotka v sobě zahrnuje několik senzorů, které jsou k řídicí jednotce připojeny pomocí datové sběrnice.

1.8.2 Senzory

1.8.2.1 Určení polohy

Pro určení polohy multikoptéry slouží systém GPS. Tento systém byl vyvinut americkou armádou v 70. letech. Hlavním cílem tohoto vývoje bylo vytvoření přesného navigačního systému pro mezikontinentální balistické střely. Navigační signál se skládá z několika částí. Základ systému tvoří satelity umístěné na oběžné dráze, ve výšce zhruba 20.000 km nad zemským povrchem. Každý ze satelitů vysílá kódovaný rádiový signál, který obsahuje informace o poloze družice a času vyslání signálu. [11]

Rádiové signály jsou přijímány anténou umístěnou na zařízení. Pozice jednotlivých družic je předem známa. Pozice stroje je určena výpočtem vzdáleností jednotlivých družic od antény. Na *Obr. 1.8.1.1.1* je ukázán GPS modul EM-506, který se používá pro určení polohy stroje.

Hlavním rozdílem mezi systémem určování polohy pro navigace do aut a pro drony je v přesnosti určení polohy. Navigace v automobilech určují svoji polohu s přesností na několik metrů, ale v dronech je poloha určována s přesností na několik desítek, či jednotek centimetrů. Dále GPS přijímače pro drony určují svoji polohu s vyšší frekvencí než navigace pro automobily.



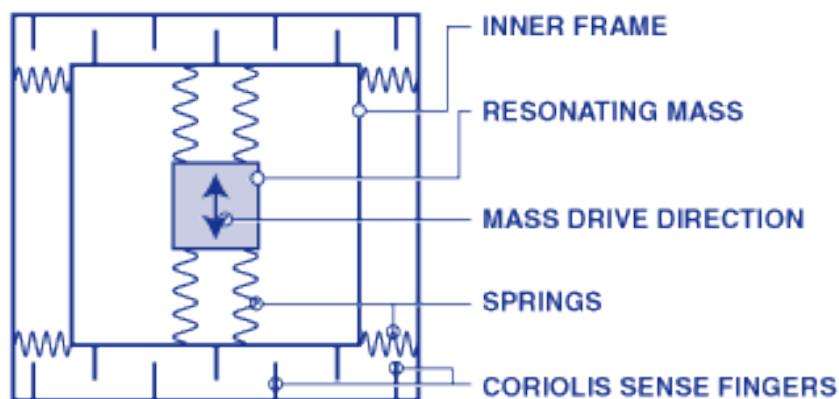
Obr. 1.8.1.1.1 GPS modul EM-506 [12]

1.8.2.2 Gyroskop

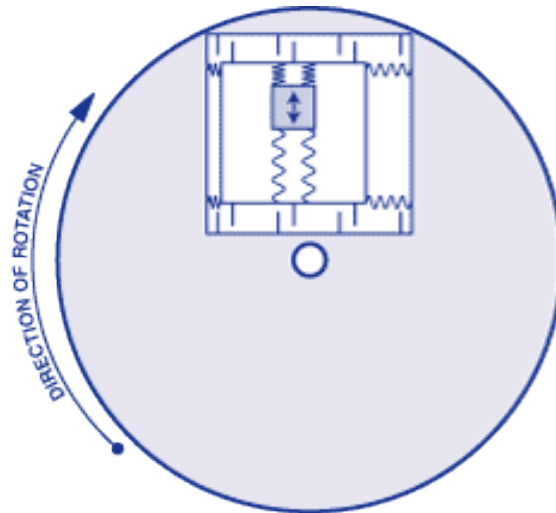
Jedná se o jeden z několika hlavních snímačů, které jsou nezbytné pro správnou stabilizaci dronu za letu. Gyroskop je zařízení, které slouží k měření změny polohy, nebo natočení předmětu, kterému je gyroskop připevněn. Dříve tyto senzory využívali několika rotujících kotoučů. Toto provedení bylo velmi náročné na kvalitu zpracování materiálů, a také celý gyroskop byl poměrně velký. V současné době je výhodné využít gyroskopů v integrované podobě. Hlavními důvody jsou: cena, váha a rozměry. [13]

Gyroskopy slouží pro měření úhlové rychlosti okolo určité osy. U gyroskopů určených pro drony je rychlost rotace měřena okolo tří os. Gyroskopy v integrované podobě pracují na principu Coriolisovy síly. Tato síla vzniká při pohybu tělesa pohybujícího se určitou rychlostí v soustavě, která rotuje okolo osy rotace. Směr a velikost této síly je úměrná velikosti rychlosti otáčení, hmotností tělesa, velikosti rychlosti a směru pohybu tělesa. [13]

Gyroskopy v integrované podobě využívají technologii MEMS. Tato technologie je založena na vytváření mechanických struktur společně s elektrickými obvody v rámci jednoho integrovaného obvodu. Zjednodušený náčrt struktury gyroskopu je znázorněn na *Obr. 1.8.2.2.1*. Základem každé osy gyroskopu je rezonující objekt s přesně definovanou hmotností a upevněný k vnitřnímu rámu pomocí pružin. Směr pohybu rezonujícího objektu musí být kolmý k dané ose rotace, znázorněno na *Obr. 1.8.2.2.2*. Vnitřní rám je upevněn k vnějšímu rámu pomocí pružin a doplněn o měřicí plošky. [13]

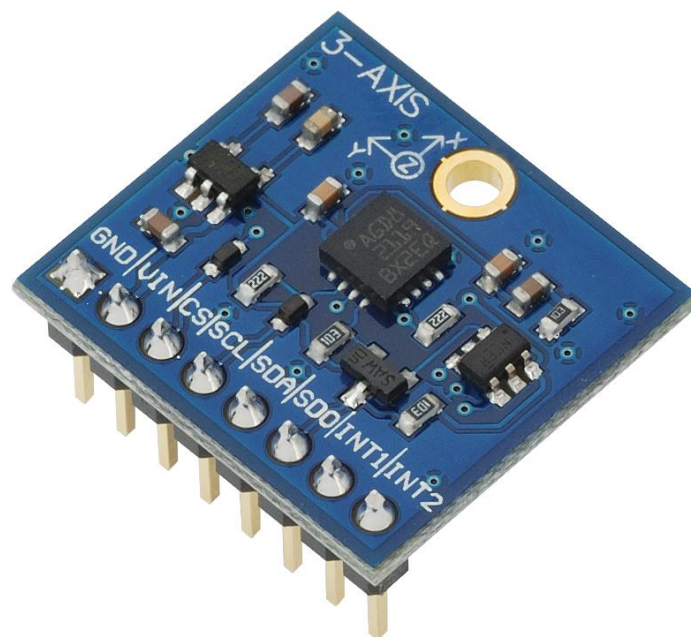


Obr. 1.8.2.2.1 Zjednodušený náčrt struktury snímače gyroskopu [13]



Obr. 1.8.2.2.2 Umístění snímače gyroskopu vzhledem ke snímané ose rotace [13]

Měřicí plošky tvoří vzduchový kondenzátor. Změna polohy vnitřního rámu způsobuje změnu kapacity mezi těmito ploškami. Kapacita mezi měřicími ploškami je měřena snímací elektronikou a dále zpracovávána. Nejprve dochází k převodu velikosti kapacity do digitální podoby, která je dále převáděna na vhodný výstupní signál. Data z gyroskopu mohou být předávána nadřazenému mikroprocesoru analogově pomocí D/A převodníku, nebo pomocí sběrnic I²C a SPI. Integrované gyroskopy umožňují změnit parametry snímání pomocí komunikace na sběrnici. Na Obr. 1.8.2.2.2 je zobrazen modul tříosého gyroskopu. [13]

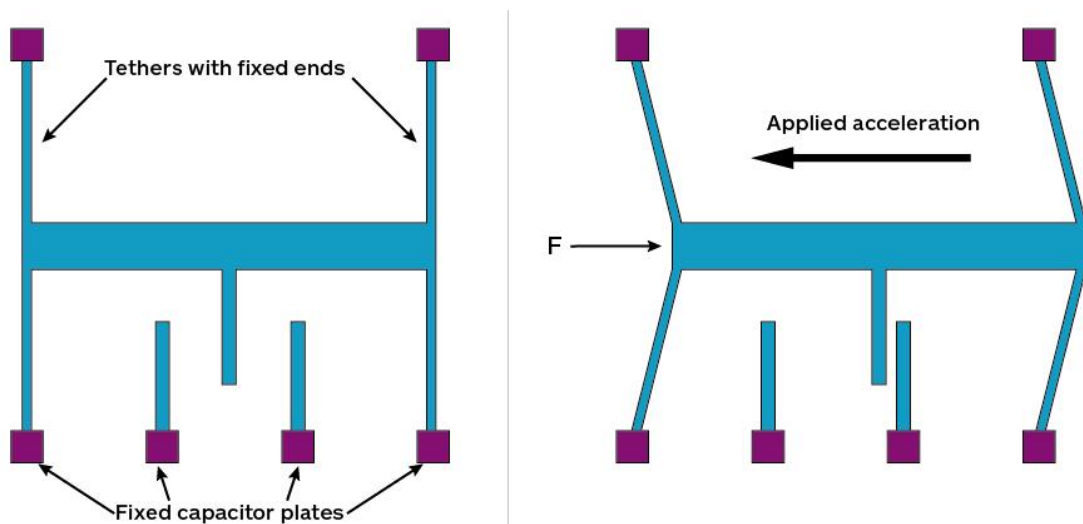


Obr. 1.8.2.2.2 Modul tříosého gyroskopu L3G4200D [14]

1.8.2.3 Akcelerometr

Na rozdíl od gyroskopu, který měří úhlovou rychlost otáčení, měří akcelerometry velikost zrychlení podél určité osy. Akcelerometry mají jednodušší konstrukci než gyroskopy. Zjednodušený nákres akcelerometru, který využívá principu změny kapacity je zobrazen na *Obr. 1.8.2.3.1*.

Akcelerometr je tvořen středovou částí, která je spojena s úchyty pomocí pružin. Vlivem zrychlení dochází k posuvu středové části, ke které je připevněna elektroda kondenzátoru. Vlivem změny polohy středové elektrody dochází ke změně kapacity vůči dvěma pevně umístěným elektrodám. Velikost jednotlivých kapacit určuje vychýlení pohyblivé části akcelerometru.



Obr. 1.8.2.3.1 Zjednodušený nákres kapacitního akcelerometru [15]

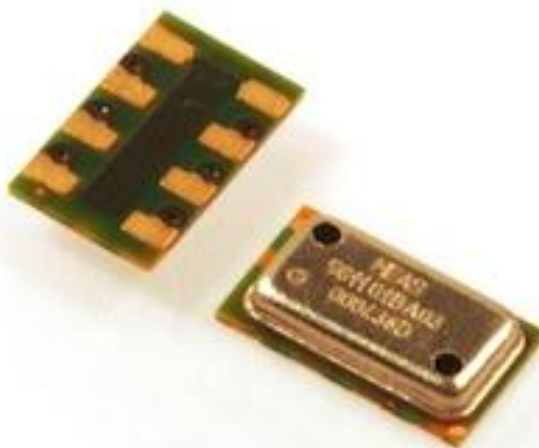
Tímto způsobem lze snadno vytvořit jednoosý a dvouosý akcelerometr. Jednotlivé osy akcelerometru jsou na sebe navzájem kolmé. Třiosý akcelerometr vyžaduje odlišnou konstrukci, protože v ose Z vyžaduje akcelerometr výškově pohyblivou konstrukci. Z tohoto důvodu mají akcelerometry v osách X a Y shodné parametry, odlišné od osy Z.

Podle zvoleného výrobce akcelerometru je možné zvolit i způsob komunikace s řídicí jednotkou. Některé typy převádí zrychlení na analogový signál, kdy velikost výstupního napětí je úměrná velikosti zrychlení. Dalšími způsoby předávání informací je pomocí sběrnic I²C a SPI, nebo pomocí pulzně-šířkové modulace.

1.8.2.4 Barometr

Barometr je snímač tlaku, který se v letadlech používá pro určení nadmořské výšky. Tyto senzory mohou pracovat s rozlišením několika desítek centimetrů. Řídící jednotce dronu pomáhá tento senzor stabilizovat výšku dronu.

Barometry používané v dronech pracují na principu piezoelektrického jevu. Při změně tlaku dochází k různému stlačení piezoelektrického materiálu a tím se mění odpor materiálu. Se změnou odporu dochází ke změně měřeného proudu, který protéká snímačem. Snímací elektronika obsahuje 24-bitový A/D převodník, který převede měřenou veličinu do digitální podoby. Převod signálu do digitální podoby umožňuje přesnou kalibraci barometru a snazší předávání informací o nadmořské výšce do řídicí elektroniky. Elektronika uvnitř barometru dovoluje také nastavit rozlišení a periodu snímání. Komunikace se nejčastěji provádí pomocí sériové sběrnice I²C, nebo SPI.



Obr. 1.8.2.4.1 Barometr MS5611-01BA03 [16]

Barometry v SMD podobě jsou ideálním senzorem pro měření nadmořské výšky díky malým rozměrům a nízké hmotnosti. Další výhodou barometrů je jejich poměrně vysoká přesnost a nízká spotřeba elektrické energie, která se pohybuje v řádech mikroampér. Při letu v nízkých výškách je ideální doplnění údajů z barometru s údaji z dalších čidel. Jako doplňující čidla je vhodné využít ultrazvuk, kamery či laserový měřič vzdálenosti.

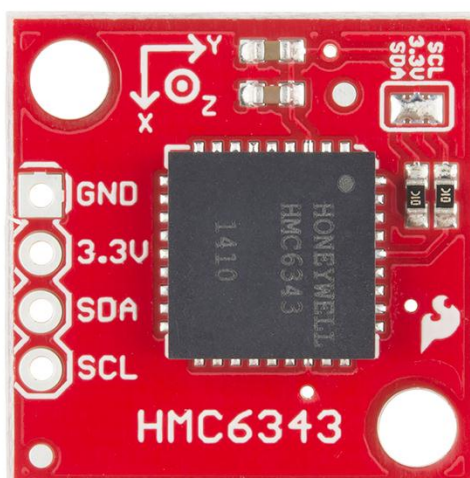
1.8.2.5 Magnetometr

Magnetometr je elektronický kompas, který udává natočení dronu vůči magnetickému poli země. Údaje z kompasu pomáhají řídicí jednotce stabilizovat let dronu.

V elektronických kompasech jsou použity magnetorezistivní senzory pracující na principu změny odporu materiálu vlivem intenzity magnetického pole. Bez působení vnějšího magnetického pole protéká proud senzorem nejkratší možnou dráhou. Pokud na senzor začne působit magnetické pole, dráha proudu se vychýlí, čímž dojde ke zvýšení odporu materiálu. Jednotlivé senzory jsou zapojovány do můstků a středy obou větví jsou připojeny na vstupy operačního zesilovače. Ten rozdílové napětí dostatečně zesílí. Takto zesílené napětí je dále převedeno do digitální podoby pomocí A/D převodníku a dále zpracováno mikroprocesorem kompasu. Magnetorezistivní senzory jsou citlivé na změnu teploty, je proto nutné teplotu jednotlivých senzorů měřit a zohlednit ji při výpočtu magnetického pole. Pro každou osu kompasu je nutné použít samostatnou skupinu senzorů.

Kompasy jsou velice citlivé na vnější magnetické pole, díky této vlastnosti je možné senzory snadno zničit. Velké nebezpečí pro kompas představuje neodborná montáž, kdy se v okolí senzoru použije například zmagnetizovaný šroubovák. Kompas je tak nenávratně poškozen a je nutná jeho výměna.

Kompas je možné osadit přímo na řídicí elektroniku, nebo je možné jej použít na samostatné desce, jak je zobrazeno na *Obr. 1.8.2.5.1*.



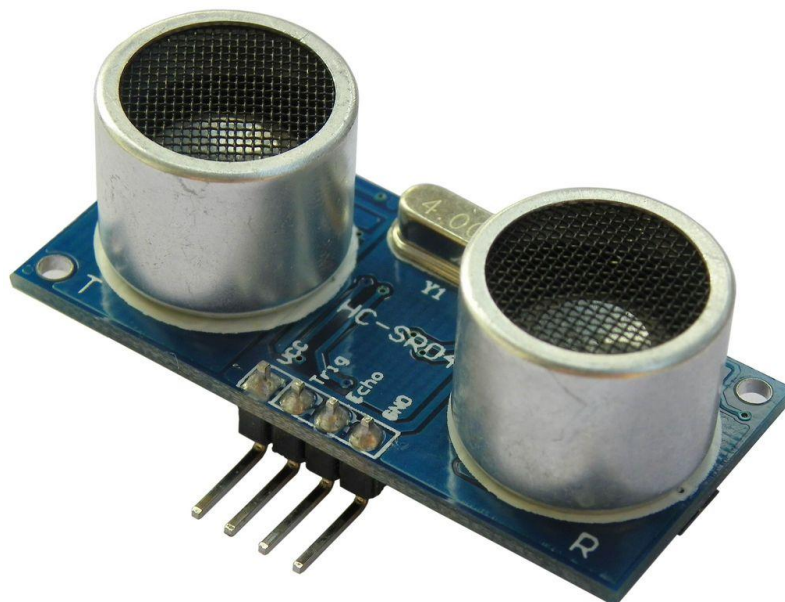
Obr. 1.8.2.5.1 Modul kompasu HMC6343 [17]

Modul kompasu je možné nastavit dle požadavků na přesnost a obnovovací frekvenci. Přenos dat je řešen pomocí sběrnice I²C.

Rozložení magnetického pole na povrchu Země není homogenní, a proto je nutná kalibrace kompasu při změně místa startu. V případě, že kalibrace kompasu není provedena, je pravděpodobné, že dojde k pádu stroje. Nebezpečí pro kompas představuje například let blízko elektrického vedení.

1.8.2.6 Lokalizace překážek

Doposud popsané senzory sloužily pro zjišťování polohy a pohybu stroje. Pro bezpečnější let se na dron umísťují zařízení, které pomáhají řídicí jednotce lokalizovat objekt, ke kterému se dron přibližuje. Při letu může nastat situace, kdy pilot nedopatřením navede dron na nesprávnou dráhu letu a dron by poté mohl narazit například do stromu, skály, nebo osob. Senzorů pro lokalizaci překážek může být použito několik druhů. Například kamery, nebo laserové skenery. Použití těchto zařízení klade vysoké nároky na elektroniku, zpracovávající data z těchto zařízení. Nejlevnějším a nejjednodušším řešením je použití ultrazvukového dálkoměru. Na *Obr. 1.8.2.6.1* je zobrazen ultrazvukový dálkoměr, který může být použit pro měření vzdáleností na dronech.



Obr. 1.8.2.6.1 Ultrazvukový dálkoměr HC-SR04 [18]

Ultrazvukový dálkoměr pracuje na jednoduchém principu, kdy ultrazvukový dálkoměr vysílá a přijímá zvukové vlny. Měření vzdálenosti od objektu je založeno na měření doby mezi vysláním vlny a příjmem odražené vlny od objektu. Výpočet vzdálenosti je poté jednoduchý díky změřenému času a znalosti rychlosti šíření ultrazvuku v daném prostředí.

Výhodou ultrazvukových dálkoměrů je jejich jednoduchý princip a díky tomu jsou tyto senzory poměrně levné. Ultrazvukové senzory mají malé rozměry a nízkou hmotnost, a proto je možné do stroje umístit i více senzorů. Další výhodou představuje rozptyl ultrazvukových vln v určitém rozsahu. Vzhledem k tomuto rozptylu je vzdálenost od určitého objektu měřena na větší ploše, než by tomu bylo například u laserového dálkoměru, který by musel být přesně zaměřen na měřený objekt.

Ultrazvukové dálkoměry je vhodné použít pro detekci překážek, které se nacházejí v dráze letu. Díky lokalizaci překážky může řídicí jednotka zamezit nárazu stroje do takovéto překážky. Další využitím těchto dálkoměrů je měření výšky dronu při letu v nízkých výškách, nebo při přistání. Příklad umístění těchto senzorů je na *Obr. 1.8.2.6.2*. Údaje z dálkoměru doplňují údaje z barometru a pomáhají tak stabilizovat let. Tyto údaje mohou být také využity při automatické aktivaci přistávacího mechanismu, kdy řídicí elektronika vyhodnocuje výšku nad zemí a při překročení určité hranice dojde k automatickému otevření podvozku.



Obr. 1.8.2.6.2 Umístění ultrazvukových dálkoměrů DJI Phantom 4 [19]

1.8.2.7 Ostatní senzory

V předchozích odstavcích byly popsány základní senzory, které jsou využívány pro stabilizaci letu dronů. Na drony jsou umísťovány další senzory, díky kterým získají drony další funkce. Přidáním dalších složitých senzorů se zvyšuje jednak celková váha stroje, ale také nároky na výpočetní výkon řídicího systému. Díky těmto nutným změnám roste celková cena stroje a tyto senzory se používají u specializovaných strojů.

Jedním z dalších senzorů může být například laserový skener. Tento senzor měří svoji vzdálenost od objektů v rámci jedné roviny senzoru. Na *Obr. 1.8.2.7.1* je zobrazen laserový skener Hokuyo UTM-30LX-EW, který je schopen měřit vzdálenost do 30m v rozsahu 270°. Tento skener udává jednotlivé vzdálenosti s krokem 0,25° a přesností $\pm 30\text{mm}$ (na vzdálenost 0,1 až 10m).



Obr. 1.8.2.7.1 Laserový skener Hokuyo UTM-30LX-EW [20]

Data získaná ze skeneru umožňují řídicí jednotce vytvořit mapu okolí dronu a díky tomu lokalizovat blížící se překážky. Mapa okolí umožňuje také výpočet alternativní dráhy stroje a jeho pokračování k zadanému cílovému stanovišti.

Laserový skener je pouze jedním z několika senzorů, které se na drony mohou přidat. Drony mohou také využívat stereo kamery, které umožňují řídicí jednotce lokalizovat vzdálenost a pozici pohybujících se předmětů před dronem. Výhodou těchto kamer oproti laserovému skeneru je nízká pořizovací cena a nízká hmotnost kamer. Díky těmto vlastnostem jsou tyto kamery vhodné i pro menší stroje.

1.8.3 Záznam letových dat

V průběhu každého letu multikoptéry může dojít k celé řadě nebezpečných situací, které ohrožují bezpečnost letu. V určitých případech, jako je například výpadek GPS lokalizace, je nutný zásah operátora a manuální řízení stroje na základě vizuálního sledování. Další rizikovou situací je například zmagnetizování kompasu, vlivem silných magnetických polí v okolí. V takovémto případě jsou data z kompasu neplatná. Řídící jednotka se nadále snaží udržovat led dronu, ale na základě chybných dat udává nesprávné údaje regulátorům motorů a následkem může být pád stroje. V jiném případě může dojít k poruše regulátoru a výpadku jednoho z motorů.

Ve všech těchto případech je důležité pořízení záznamu dat z průběhu letu, díky kterým je možné zpětně dohledat příčinu poruchy. Pro záznam dat se používají speciálně navržené zařízení, označované jako letový záznamník. Toto zařízení má za úkol shromažďovat veškerá data ze senzorů a řídicí jednotky a ukládat je na záznamové zařízení. V některých případech je toto zařízení vybaveno vlastní sadou senzorů, které jsou nezávislé na senzorech dronu. Na *Obr. 1.8.3.1* je zobrazen datový záznamník pro ukládání pozice dronu.



Obr. 1.8.3.1 Letový záznamník Parrot AR.Drone 2.0 Flight Recorder [21]

Některé varianty řídicích jednotek podporují připojení paměťové karty, na kterou samy zapisují údaje o stavu dronu a pokyny operátora. Záznamové zařízení mohou obsahovat také vysílačky, kterými je dron řízen. Ty zapisují přijaté údaje od letounu. V případě pádu stroje a jeho hledání jsou v těchto údajích uloženy poslední hodnoty odeslané před ztrátou spojení s letounem. Důležitým údajem je pozice letounu, podle které je snazší nalezení havarovaného stroje. Tyto data mohou být také užitečná v případě, že se záznamové zařízení v letounu následkem pádu poškodí a data nemohou být přečtena.

1.8.4 Ovládání stroje

U každého stroje je nutné jeho ovládání. Multikoptéra může mít naprogramovány určité letové úkony, které je schopna sama vykonat. Pokyn k vykonání těchto úkonů musí vždy odeslat operátor, který je zodpovědný za provoz stroje. Multikoptéra se může vzdálit od operátora na vzdálenosti i několika kilometrů, z tohoto důvodu je pro přenos pokynů operátora volen bezdrátový přenos dat, který využívá radiové vlny.

Moderní stroje využívají přenos signálu na nosné frekvenci 2,4GHz a využitím PCM modulace. Tento typ modulace umožňuje dostatečné zabezpečení přenášených dat o povelch operátora. Díky kódovanému signálu je možné používat více zařízení na stejné nosné frekvenci, aniž by došlo k jejich vzájemnému rušení. U každého přijímače je nutné jeho spárování s vysílačem před začátkem jeho používání. RC soupravy používající frekvenci 2,4GHz umožňují přenos dat z přijímače do vysílače. Tento zpětný přenos dat je výhodný jednak pro ověření kvality přenosu, a také pro přenos dalších dat získaných přijímačem. Těmito daty mohou být například telemetrické údaje ze senzorů rozmístěných na trupu stroje, nebo také aktuální stav baterií, případně jiné údaje, které jsou důležité pro bezpečný let.

Na rozdíl od klasických RC letadel, kdy přijímač řídí přímo výchylky jednotlivých servo pohonů, u dronů jsou signály přijímače přenášeny do řídicí jednotky, která ovládá chování stroje. Pro spojení řídicí jednotky s přijímačem existuje několik způsobů. Jedním z možných řešení je zabudování přijímače přímo do řídicí jednotky. Toto řešení představuje výhodu především v jednoduchosti, není zapotřebí dalších propojovacích kabelů a samostatného modulu přijímače. Nevýhodou může být, že při poruše přijímací části je nutná výměna celé řídicí jednotky. Dalším způsobem je použití samostatného modulu přijímače, který je s řídicí jednotkou spojen pomocí propojovacích kabelů. Pro spojení řídicí jednotky s přijímačem je možné využít několika kabelů, kdy každý kabel přenáší data z jednoho kanálu. Optimálním řešením spojení řídicí jednotky a přijímače je využití speciálně navržené sběrnice, která slouží ke kompletnímu přenosu dat. Tato sběrnice byla vyvinuta firmou Futaba a je označována jako S.BUS. Využitím této sběrnice se minimalizoval počet propojovacích kabelů a značně se tím zjednodušila výroba dronů.

Operátor řídí stroj pomocí vysílačky, která je kompatibilní s přijímačem v dronu. Pro tyto účely mohou být použity speciálně navržené vysílačky se zabudovaným displejem, na kterém jsou zobrazovány telemetrické údaje. Na displeji může být zobrazován také obraz z kamery umístěné na dronu. Jako příklad je zde uvedena vysílačka na *Obr. 1.8.4.1* Yuneec ST16. Tato vysílačka umožňuje ovládání letu dronu, nastavení kamery, a také zobrazuje přenášený obraz přímo na svojí obrazovce. Další výhodou této vysílačky je možnost přenosu obrazu do dalších zařízení.



Obr. 1.8.4.1 Vysílačka Yuneec ST16 [22]

Dron je také možné ovládat z takzvaného operátorského pracoviště. Operátor může pracovat na speciálně navrženém pracovišti, kterým může být vybaveno například zásahové vozidlo. Operátorské pracoviště umožňuje ovládání dronu z uzavřeného pracoviště, do kterého mají přístup pouze povolané osoby. Takovéto pracoviště musí být vybaveno dostatečným množstvím techniky umožňující bezpečný let dronu. Operátor sleduje stav dronu pomocí několika obrazovek, na kterých jsou zobrazována potřebná data pro pilotování stroje. Využití operátorského pracoviště je výhodné zejména při dlouhých letech dronu, nebo v případě nepříznivých klimatických podmínek pro operátora. Nevýhodou tohoto pracoviště je, že operátor nemá přímou vizuální kontrolu nad strojem.

1.8.5 Regulátory otáček

Aby bylo možné spustit jednotlivé motory, je zapotřebí výkonově posílit signály z řídicí jednotky. K tomuto účelu slouží speciálně navržená elektronika. Regulátory můžeme rozdělit podle použití pro stejnosměrné, nebo střídavé motory. Regulátory přijímají signál o rychlosti z řídicí jednotky. Tento signál má rozsah od nulových do maximálních otáček motoru.

Stejnosemné regulátory mají jednodušší zapojení elektroniky ve srovnání s regulátory pro střídavé motory. Výkonovou část tvoří snižovací pulzní měnič. Podle přijatého signálu je nastavována střída výstupního signálu.

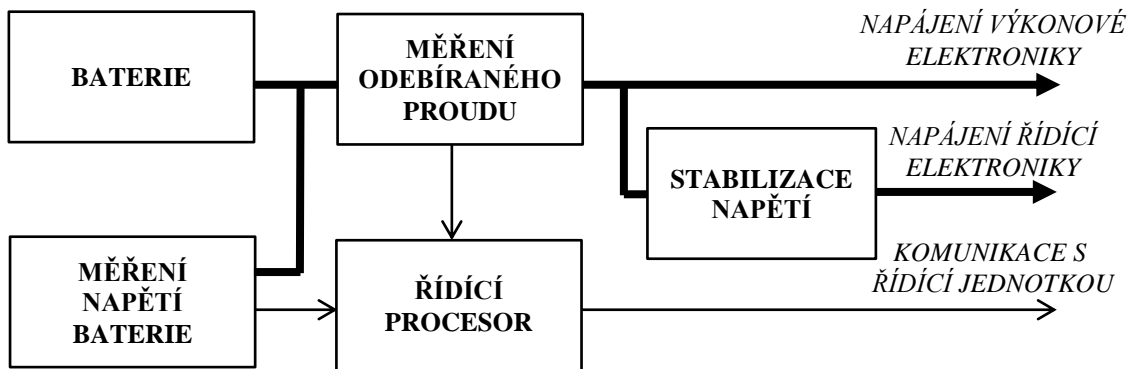
Regulátory pro střídavé motory jsou složitější než regulátory pro stejnosměrné motory. Příklad takového regulátoru je zobrazen na *Obr. 1.8.5.1*. Výkonovou část tvoří třífázový střídač s napěťovým meziobvodem. U regulátorů pro střídavé motory se používají dvě varianty. První varianta používá u motorů snímače polohy, díky kterým elektronika zjistí přesný okamžik přepnutí jednotlivých fází. Druhá varianta snímače natočení nepoužívá. Pro snímání natočení rotoru je využíváno měření napětí na neaktivní fázi motoru. Tato varianta je náročnější na elektroniku regulátoru, ale zjednodušuje mechaniku motoru a není třeba připojení více vodičů k motoru, a proto je nejvíce používána.



Obr. 1.8.5.1 Regulátor otáček pro střídavý motor T-MOTOR FLAME 80A [23]

1.8.7 Napájecí elektronika

Důležitou součástí dronu je napájecí elektronika, která se skládá z několika částí. Jednou částí je stabilizace napětí pro řídicí elektroniku. Další část zajišťuje měření baterií. Blokové schéma napájecí elektroniky je zobrazeno na *Obr. 1.8.8.1*.



Obr. 1.8.8.1 Blokové schéma napájecí elektroniky

Stabilizátor napětí má za úkol snižovat napětí baterie na stabilní úroveň 5V pro napájení řídicí elektroniky. Pro tyto účely se může použít buď lineární, nebo spínaný regulátor napětí. Výhodou spínaného regulátoru oproti lineárnímu je nižší tepelné zahřívání. Napětí baterií může dosahovat hodnot několika desítek voltů a na lineárním stabilizátoru by vznikala velká výkonová ztráta.

Měřicí část se stará o měření napětí z baterií a odebíraného proudu. Napětí baterie je důležitý údaj pro elektroniku. Napětí nesmí klesnout pod určitou úroveň, jinak by došlo k poškození, nebo zničení baterie. Měření odebíraného proudu slouží k vyhodnocování zbývající kapacity baterie. Oba tyto údaje jsou přenášeny do řídicí jednotky, a také pilotovi dronu. Pokud by došlo k poklesu pod určitou hodnotu napětí, řídicí jednotka vyšle pilotovi signál s pomocí stavové led diody. V případě, že dojde k poklesu pod kritickou úroveň, může být v řídicí jednotce nastaveno automatické přistání dronu před úplným vyčerpáním baterie. Příklad napájecího modulu je zobrazen na *Obr. 1.8.8.2*.



Obr. 1.8.8.2 Napájecí modul APM2.6 2.5 2.52 [24]

1.8.8 Gimbal

Jak již bylo popsáno v kapitole 1.4.4, Gimbal je zařízení, které slouží ke stabilizaci fotoaparátu, případně kamery a zmírnění otřesů. Stabilizaci provádí několik motorů, které ovládá samostatná řídicí jednotka gimbálu, případně hlavní řídicí jednotka dronu. Data pro stabilizaci jsou získána ze senzoru umístěného na připevňovací části pro fotoaparát. Jako senzory se používají gyroskopy a akcelerometry.

Pro ovládání jednotlivých částí gimbálu mohou být použity klasické servomotory případně BLDC motory. Klasické servomotory jsou vybaveny převodovým ústrojím a jejich nevýhodou je pomalá změna úhlu natočení výstupní hřídele. Z tohoto důvodu jsou tyto pohony nahrazovány BLDC motory, které nejsou vybaveny převodovkou, stabilizační část je napojena přímo na rotor motoru. Tyto motory schopny velmi rychle měnit úhel natočení. U těchto střídavých elektromotorů není vytvářeno točivé magnetické pole. Statické magnetické pole v interakci s magnetickým polem permanentních magnetů natočí rotor do požadované polohy.

1.8.9 FPV kamera a přenos video signálu

FPV (First Person View) kamera je umístěná na letounu a umožňuje pilotovi pohled ze stroje, jako by se v něm přímo nacházel. Díky tomu FPV kamera umožňuje pilotování jak pohledem ze země na stroj, tak i z pohledu stroje. Použití této kamery zlepšuje pilotovu orientaci, zejména pokud se dron nachází ve velké vzdálenosti od pilota. Video signál z kamery je analogový ve formátu PAL, nebo NTSC. [25]

Přenášený obraz z FPV kamery nemá příliš veliké rozlišení, ale v tomto řešení je hlavní, aby docházelo k minimální latenci mezi snímáním obrazu a zobrazením na obrazovce pilota. Pokud by měl obraz na obrazovce pilota zpoždění, nebylo by možné bezpečně pilotovat stroj, protože by pilot neměl dostatek času reagovat na vzniklou situaci. Než dojde k vyslání video signálu vysílačem, jsou do něj často přidány základní telemetrické údaje. Ty pomáhají pilotovi při určení stavu letounu. Na displej je možné přidat pouze omezené množství údajů, z důvodu přehlednosti. Ostatní telemetrické údaje je možné přenášet pomocí speciálního vysílače telemetrie.

Vysílání video signálu je prováděno na celé řadě frekvencí od 900MHz do 5,8GHz. Každá z těchto frekvencí nabízí určité výhody a nevýhody. Volba frekvence se odvíjí od požadovaného dosahu signálu a náchylnosti na rušení. Další problém při vysílání FPV videa je možnost rušení příjmu signálu pro řízení dronu. Proto musí být vysílání video signálu na jiném kmitočtu než je příjem pro ovládání dronu. Vysílání na dané frekvenci také podléhá omezení vysílacího výkonu. Tento výkon udává Český telekomunikační úřad. Pro frekvenci 2,4 GHz je vysílací výkon omezen na 100mW a pro frekvenci 5,8GHz je omezení 1W. Na *Obr. 1.8.9.1* je zobrazen vysílač FPV video signálu na frekvenci 5,8GHz o výkonu 600mW.



Obr. 1.8.9.1 FPV vysílač TS5828 32CH [26]

Napájení vysílače může být odlišné dle daného typu, ve většině případů bude vysílač potřebovat napájení 12V. V závislosti na vysílacím výkonu je nutné vhodně zvolit umístění vysílače. Během provozu se vysílač může značně zahřívat, proto je nutné umístit vysílač na dobře chlazené místo, kde bude zajištěn dostatečný odvod tepla. Dále je nutné vysílač umístit co nejdále od přijímače GPS signálu, aby nedocházelo k rušení, a tak špatnému určování polohy stroje.

1.8.10 Podvozek

Mechanická část podvozku je pro každý typ dronu odlišná. Při návrhu podvozkové části je důležité, zda bude pod strojem umístěno přídavné zařízení a jaké jsou jeho požadavky. V případě, že pod dronem bude umístěna kamera, která se nebude otáčet vzhledem k ose Z stroje a podvozek nebude v zorném poli kamery, není nutné, aby se podvozek skládal. V oparném případě, kdy se kamera bude otáčet, by mohl podvozek bránit otáčení, nebo narušovat záběry z kamery. Pro tento případ jsou na dron umísťovány sklápěcí podvozky, případně je celý dron navržen tak, aby po startu mohlo dojít ke změně pozice kamery a záběry nebyly narušovány podvozkovou částí.

Ovládání podvozku zajišťuje hlavní řídicí jednotka dronu. Podvozek může být sklápěn automaticky v závislosti na výšce stroje nad zemí. Minimální výška pro otevření či zavření podvozku bývá minimálně jeden metr nad zemí. Výšku pro změnu polohy podvozku je možné určit pomocí startovní pozice, kdy má řídicí jednotka údaje o poloze ze systému GPS, údaje barometru, a také je možné využít ultrazvukového dálkoměru. Použití dálkoměru pro automatické otevírání podvozku je velice výhodné, zejména v případě, když by dron byl nucen přistát v jiné výšce než byla na startovní pozici. Další možností ovládání podvozku je manuální režim, kdy je poloha podvozku ovládána přepínačem na vysílače.

Pro otevírání a zavírání podvozku může být použito mnoho druhů mechanismů. Mezi jednodušší typy převodovek se řadí například otevírání za pomoci šnekového převodu. Tato převodovka je zobrazena na *Obr. 1.8.10.1*. Tělo převodovky je připevněno do trupu pomocí několika šroubů, spojení elektroniky s motorem zajišťuje konektor umístěný v horní části převodovky. Pohon zajišťuje stejnosměrný motor. Podvozková noha se umísťuje do pohyblivé části převodovky.



Obr. 1.8.10.1 Převodovka otevírání podvozku [27]

1.9 Baterie

Hlavní součástí každého dronu je jeho napájecí systém. Velké drony, které pro pohon využívají spalovacích motorů, mohou využívat pro generování elektrické energie alternátor spojený s hřídelí spalovacího motoru. Toto řešení je stejné, jako u malých letadel, nebo u automobilů. Dron poté potřebuje pouze malou baterii pro startování, případně při výpadku dobíjení. Menší drony nejsou vybaveny spalovacím motorem, a proto pro jejich pohon je zapotřebí mnohem větší baterie, než v předchozím případě. Na rozdíl od automobilových baterií jsou na baterie pro drony kladeny mnohem vyšší nároky, zejména hmotnost baterie je velice důležitá z hlediska doby letu. Baterie musí být schopna dodávat poměrně vysoký trvalý vybíjecí proud. Tento proud se pohybuje řádově v desítkách ampér.

Vzhledem ke svým příznivým vlastnostem jsou v současné době nejvíce používány lithiové akumulátorové články. Příklad baterie složené z lithiových článků je na *Obr. 1.9.1*. Hlavní výhodou těchto článků je jejich velmi nízká hmotnost v porovnání s niklovými, či olověnými typy akumulátorů. Tyto akumulátory jsou schopny pojmout větší množství energie při nižší hmotnosti. Dalším rozdílem je vyšší napětí jednotlivých článků, kdy nejběžnější jmenovité napětí článku je 3,6V. V průběhu vybíjení dochází k poklesu napětí jednotlivých článků. Tento pokles je výhodný při měření zbytkové kapacity akumulátoru. Nevýhodou těchto akumulátorů je jejich vysoká náchylnost na podvybití. Při poklesu napětí pod mez danou výrobcem článku hrozí jeho nenávratné poškození. [28]

Při nabíjení z podvybitého stavu je nutné, aby nabíjecí souprava byla schopna nabíjet podle přesně daného nabíjecího režimu, který ke každému akumulátoru udává výrobce. Díky možnosti podvybití je nutné, aby baterie byla vybavena elektronikou, která je schopna baterii odpojit než dojde k jejímu zničení podvybitím. Tato elektronika se pro primární pohonnou baterii na dronech nepoužívá. Pokud by elektronika odpojila baterii, dojde k pádu stroje. Z tohoto důvodu je přednější bezpečné přistání dronu za cenu zničení akumulátoru.

Pro běžné nabíjení lithiových akumulátorů se používá metoda označovaná, jako CCCV (Constant Current followed by Constant Voltage). Nejprve je baterie nabíjena konstantním proudem, dokud hodnota napětí nedosáhne stanovené úrovně. Od této úrovně je hodnota nabíjecího proudu snižována a je udržováno konstantní nabíjecí napětí. Nabíjení je ukončeno, pokud proud klesne pod stanovenou hodnotu. Některé automatické nabíječe jsou vybaveny i časovou ochranou nabíjení, kdy při překročení určité doby se nabíjení přeruší. U lithiových akumulátorů nedochází k přebíjení. V případě, že by k přebíjení docházelo, může být ohrožena funkce jednotlivých článků a snižována celková kapacita baterie. [29]



Obr. 1.9.1 Li-Poly akumulátor
GENS ACE LIPO TATTU série - 6S 16000 mAh 22,2V (15C) [30]

2 Základní požadavky

Funkce integrovaného záchranného systému může být zdokonalena při použití speciálně navržených dronů. Každý typ dronu má svojí specifickou oblast použití a může být přínosný určitým složkám IZS.

Jedním z příkladů využití dronů může být lokalizace lesního požáru. Pro tento úkol je nejvýhodnější použití dronu jehož trup je odvozen od klasické křídlové konstrukce. Takovýto typ dronu je schopen prozkoumat poměrně velikou oblast na jednu sadu akumulátorů, a proto může být využit při průběžném sledování vytyčené hranice. Trajektorie letu může být předem nahrána do řídicí jednotky a obsluha řídí pouze start a přistání stroje. Největší výhodou této konstrukce je vysoká rychlost letu při nízké spotřebě elektrické energie. Nevýhodou může být, že v případě potřeby statického záběru z kamery není stroj schopen zůstat na stejné pozici ve vzduchu.

Pro vytvoření statického záběru z kamery je výhodné využít vlastností multikoptéry. Doba letu je kratší než u předchozího typu letounu, nicméně tento dron poskytuje statický záběr, a proto je jeho nasazení výhodné například při sledování zásahu hasičů. Další využití multikoptéry může být sledování určitého objektu termokamerou. Zásadní je v tomto případě pomalý pohyb stroje, který umožní operátorovi zmapovat objekt a lokalizovat ohnisko požáru. Tento typ dronu podporuje také pohyb po určité trajektorii. Dron by mohl být využit k automatickému průběžnému monitorování určitého objektu z několika zadaných bodů. Takovéto záběry poskytnou důležité údaje během zásahu, tak i při následném vyšetřování.

Drony mohou být vybaveny například hasičské a policejní jednotky. Pro přepravu dronů mohou jednotky využít speciálně upravených vozidel, které jsou vybaveny stanovištěm pro pilotování stroje a sledování obrazu z kamer. Obraz z kamer může být ihned předáván veliteli zásahu, který je využije při plánování záchranné akce. Tyto vozidla jsou dále vybavena záložním zdrojem energie a nabíjecí stanicí pro pohonné baterie dronu.

2.1 Bezpečnost a spolehlivost

Aby mohly být drony efektivně nasazeny v IZS, je nutné, aby byly dostatečně spolehlivé a bezpečné. V případě potřeby rychlého vzletu je zásadní doba spuštění jednotlivých strojů do akce. Dobu uvedení do provozu bude ovlivňovat složitost každého stroje a potřeby jeho předletových příprav. Pro nasazení v IZS je nutné, aby tato doba byla co nejkratší. Z hlediska bezpečnosti je důležité, aby každý stroj byl vybaven diagnostickým systémem, který bude zaznamenávat potřebné údaje o stavu letounu. Tyto údaje mohou být například teploty jednotlivých článků baterií, velikost odebíraného proudu, nebo i snímání vibrací v kostře stroje. Tyto informace je nutné předávat do operátorského stanoviště. Díky tomuto systému je možné předejít nežádoucím krizovým situacím.

Během letu je pravděpodobné, že dojde ke střetu s cizím objektem. Může se stát, že na dron spadne část stromu, případně kolize s ptactvem. Pro tyto případy je zásadní, aby stroj byl dostatečně zakrytován a bylo zabráněno vniknutí větších těles do prostoru vrtulí. Bezpečnostní kryt by měl dále plnit úlohu ochrany proti dešti.

Vzhledem k velkému množství elektronických komponent v každém stroji je zásadní, aby veškeré vybavení bylo důkladně otestováno při nejrůznějších provozních podmínkách. Dále představují velké riziko baterie. Vlivem stárnutí a používání v nejrůznějších teplotních podmínkách může dojít ke značnému zhoršení jejich funkčnosti. Diagnostiku baterií za letu má na starost napájecí elektronika. V případě, že by jedna z baterií výrazně ohrozila let stroje, je důležité, aby došlo k jejímu odpojení. Pokud by odpojení nebylo dostatečným řešením, je nutné okamžité přistání stroje a vyndání baterie do bezpečného skladovacího boxu.

2.2 Doba letu

Jedním z hlavních parametrů dronů určených pro nasazení v IZS je doba letu. Doba letu musí být u těchto dronů co nejvyšší. Zatímco u běžných dronů je doba letu do 30 minut, zde je vyžadováno, aby byl dron schopen zůstat ve vzduchu minimálně 45 minut. Tato doba je zásadní pro bezpečné provádění daného úkolu, ať se jedná o mapování terénu, nebo o vytvoření statického pozorovacího bodu.

Zvýšení doby letu oproti běžným dronům je také důležité při nasazení pouze jednoho stroje. Po uplynutí určité doby letu je nutné vyměnit baterie. V případě nutnosti sledování, kdy je záběr z dronu nepostradatelný pro splnění daného úkolu, je zásadní, aby dron mohl zůstat ve vzduchu déle, než bude možné vyměnit baterie. Zvýšení doby letu představuje rezervu, pro takovéto vzniklé situace.

V případě nasazení více dronů je možné jejich střídání po delších intervalech. Při poklesu kapacity baterií pod určitou úroveň může být stroj nahrazen dalším. Po přistání dojde k výměně baterií a stroj je připraven k dalšímu vzletu. Při použití dvou strojů je doba letu každého z nich delší, než když je použit pouze jeden stroj. V případech, kdy je vyžadováno dlouhodobé použití dronů je výhodnější řešení s použitím dvou strojů.

2.3 Přídavná zařízení

Pro využití v IZS je nutné, aby každý dron byl schopen nést přídavné zařízení. Základním zařízením jsou různé druhy kamer. Tyto kamery umožní snímání za denního světla i během noci. Dále je důležité, aby drony byly vybaveny termokamerou, díky které získá velitel zásahu další důležité informace. Termokamera může být využita také při hledání osob. Kamery a veškeré vybavení potřebné pro zpracování a přenos obrazu má přesně definovanou váhu a je proto nutné dimenzovat stroj tak, aby dokázal i s tímto přídavným zařízením zůstat ve vzduchu po dobu minimálně 45 minut.

Dále je možnost využít dron pro přenos potřebného vybavení do místa zásahu. Toto vybavení může být značně těžší než kamerové systémy a dron musí mít dostatečně naddimenzované pohonné jednotky, aby byl schopen tuto zátěž unést. Během letu s takto těžkým zařízením se výrazně zkracuje celková doba pro let. Nejvýhodnějším řešením je dopravení potřebného vybavení na místo určení ihned po odstartování stroje. Po dopravení vybavení bude stroj plnit sledovací funkci.

3 Návrh konstrukčního řešení

Na základě základních požadavků na létající prostředky pro IZS bylo vedením společnosti AEROVISION vybrána varianta sestavit multikoptéru. Tato multikoptéra bude vytvářet statické pozorovací stanoviště. Na základě specifikovaných požadavků byla vytvořena prvotní designová studie dronu. Tato studie je zobrazena na *Obr. 3.1*. Při návrhu prvního dronu byla zvolena požadovaná doba letu 45 až 60 minut s přídatným zařízením o váze do 400g.



Obr. 3.1 Designová studie dronu pro IZS

V této studii tvoří dron nosná konstrukce a ochranný kryt. K nosné konstrukci jsou připevněny motory, podvozek a speciální upevňovací lišty. Tyto lišty slouží pro připevnění jakéhokoli zařízení na libovolné místo pomocí speciálních přichytek. Ochranný kryt představuje ochranu proti bočnímu nárazu dronu do překážky a také základní ochranu proti vniknutí stříkající vody. Na tomto kruhu jsou dále připevněny kryty vrtulí. Tyto kryty jsou umístěny pouze z horní strany, aby nedošlo k vniknutí předmětu do prostoru vrtule. Na dolní části kryty vrtulí umístěny nebudou, vzhledem k náporu vzduchu od vrtulí je málo pravděpodobné vniknutí předmětu do prostoru vrtule ze spodní části. V případě potřeby je možné doplnit tyto kryty na spodní části.

Tato verze dronu bude vybavena čtyřmi, nebo osmi rotory umístěnými do otvorů v krytu. U osmi rotorové verze budou motory umístěny po párech nad sebou. Počet motorů bude záviset na hmotnosti dronu a požadavcích na jeho nosnost. Podvozek dronu bude výklopný a v uzavřené poloze bude přesně kopírovat vnější tvar disku.

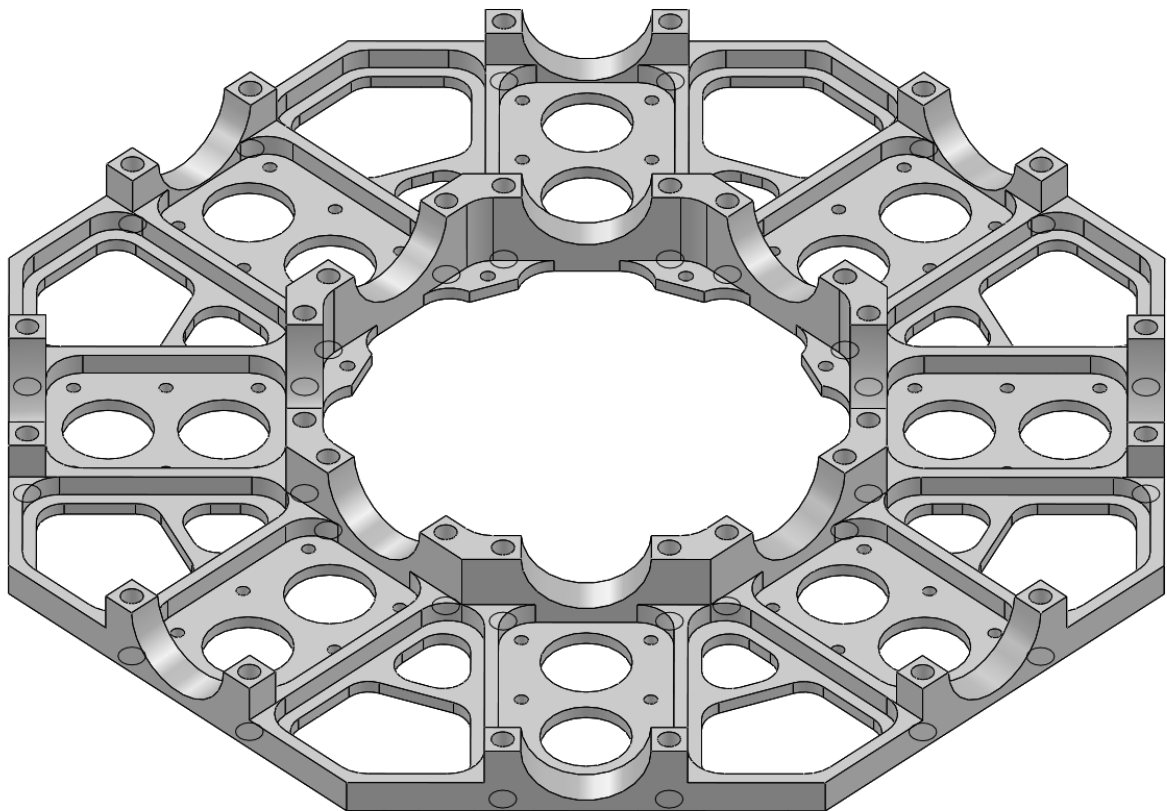
3.1 Základní koncept

Na základě designové studie byl vytvořen základní koncept. Tento koncept se skládá ze dvou samostatných částí. První část je nosná konstrukce, na které jsou namontovány pohonné jednotky, baterie a veškerá elektronika. Druhá část je ochranný kryt, který je připevněn k nosné části.

Důvodem pro vytvoření dvou samostatných částí bylo získání více zkušeností s nosnou konstrukcí a možnost vyzkoušení víc druhů ochranných krytů. Další výhodou tohoto řešení je, že dron je plně funkční i bez ochranného krytu.

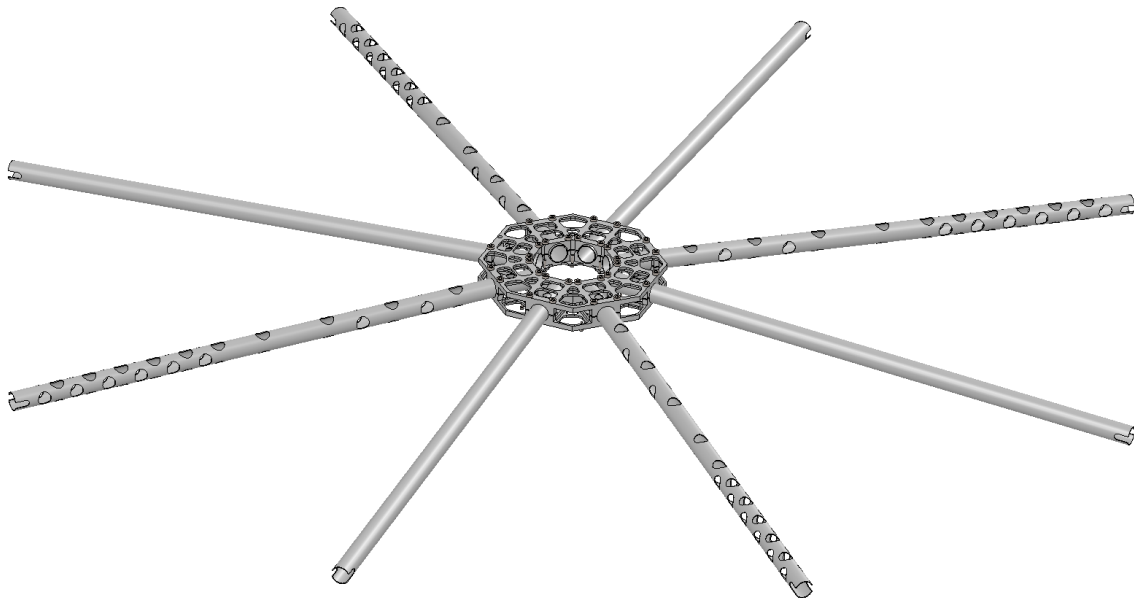
3.2 Nosná konstrukce

Základ nosné konstrukce tvoří dvoudílný svorník umístěný uprostřed konstrukce. Dolní část tohoto svorníku je zobrazena na *Obr. 3.2.1*. Do tohoto svorníku jsou připevněny nosné trubky. K těmto trubkám jsou připevněny pomocí speciálních držáků jednotlivé motory, a také podvozek.



Obr. 3.2.1 Dolní část středového svorníku

Celková sestava nosné části je zobrazena na *Obr. 3.2.2*. Jednotlivé trubky jsou umístěny se sklonem 3.7° , aby bylo možné umístit konstrukci do krytu a byla zajištěna dostatečná ochrana vrtulí. Středový svorník je kvůli dostatečné tuhosti a nízké hmotnosti vyroben z duralu. Nosné trubky jsou projektovány z karbonu z důvodu jejich tvrdosti a nízké hmotnosti. Jednotlivé součásti podvozku jsou také vyrobeny z duralu.

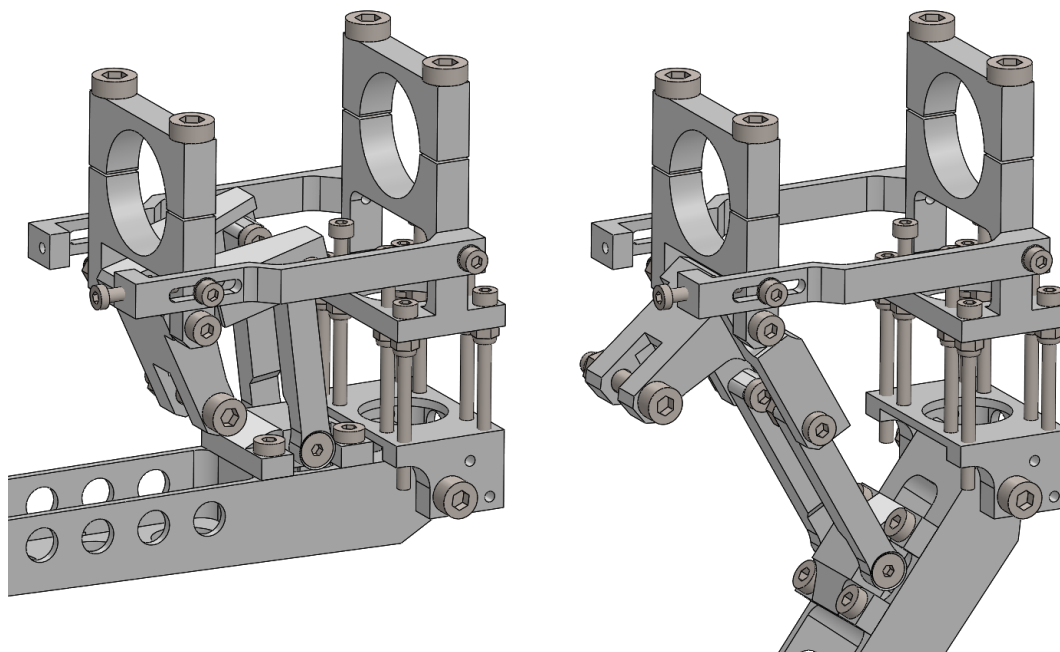


Obr. 3.2.2 Sestava nosné konstrukce

3.3 Podvozek

Podvozek tvoří čtyři samostatné nohy, které jsou doplněny o zavírací mechanismus. Tento mechanismus je navržen tak, aby bylo možné celý podvozek ovládat pouze jedním servomotorem umístěným ve středové části dronu. V případě potřeby je možné ovládat každou část podvozku samostatným servomotorem. Mechanismus je zobrazen na *Obr. 3.3.1* a je navržen tak, aby umožňoval aretaci podvozku v otevřené poloze. Díky této aretaci nevzniká tah na ovládací servomotor při dosednutí dronu na zem. Spojení mechanismu podvozku a servomotoru zajišťuje sestava táhel a kulových čepů.

Mechanismus je dále navržen tak, aby bylo možné každou podvozkovou nohu přesně naladit. Výška nohy je nastavována pomocí sady svislých šroubů umístěných nad kloubem podvozkové nohy. Nastavení nohy v otevřené poloze je prováděno pomocí změny vzdálenosti jednotlivých svorníků na nosné trubce. Pozice podvozku v uzavřené poloze je nastavována pomocí změny délky táhla.



Obr. 3.3.1 Mechanismus otevírání podvozku v zavřené a otevřené poloze

3.4 Ochranný kryt

Jak již bylo napsáno, ochranný kryt je navržen tak, aby bylo možné jeho namontování na nosnou konstrukci. Díky tomu, že je možné tento kryt sundat je možné jej také vyměnit a vyzkoušet několik variant tohoto krytu. První verze krytu se skládá ze dvou částí. Spodní část je připevněna pomocí držáků k nosným trubkám. Celá konstrukce je díky krytu také zpevněna a snižuje se chvění trubek. Na Obr. 3.4.1 je zobrazena montáž spodního dílu krytu k nosné konstrukci.



Obr. 3.4.1 Montáž spodní části krytu na nosnou konstrukci

Horní díl krytu je na konstrukci pouze položen a po obvodu sešroubován s dolní částí krytu. Na určitých místech, byla horní část krytu podepřena speciálně navrženými rozpěrami. První verze krytu obsahuje pouze průduchy na vrtule. V dalších verzích je počítáno s vytvořením více otvorů, kterými by mohl proudit vzduch a kryt by měl menší aerodynamický odpor.

První verze krytu byla vytvořena metodou laminování. Předlohu pro laminování tvořilo kopyto vytvořené z tvrzeného polystyrenu. Nosný prvek tvoří uhlíková textilie a jako pojivo je použita epoxidová pryskyřice. Problémem polystyrenové předlohy je nízká přesnost při výrobě. Pro sériovou výrobu je počítáno s výrobou kovové formy z několika částí, ve které bude kryt laminován.

4 Pohon

Při návrhu pohonu je nutné vzít v úvahu celkovou váhu dronu, požadovaný tah, odběr proudu motorů a kapacitu baterie. Vzhledem k požadavku na dobu letu více než 45 minut je nutné použít motory s co nejmenším odběrem proudu při vysokém tahu.

4.1 Motory

Na základě průzkumu trhu byl vybrán motor T-MOTOR U8 PRO KV 135. Tento motor je zobrazen na *Obr. 4.1.1*. Rotor motoru neobsahuje chladící otvory. Vzhledem k nízkému odběru proudu se motor příliš nezahřívá a nepotřebuje proudění vzduchu přes vinutí. Další výhodou tohoto řešení je, že je vinutí dostatečně chráněno před vniknutím cizích předmětů.



Obr. 4.1.1 T-MOTOR U8 PRO KV 135 [31]

Parametry zvoleného motoru jsou zobrazeny na *Obr. 4.1.2*. Tento motor generuje největší tah při použití baterie 12S a dřevěné vrtule 22x6“. Při 100% tahu vytvoří každý motor tah 4700g s odběrem proudu 14A.

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating temperature(°C)
U8 PRO KV135	22.2 (6S)	T-MOTOR 26*8.5CF	50%	2.3	51.06	980	1400	19.19	45
			65%	4.2	93.24	1530	1700	16.41	
			75%	5.6	124.32	1830	1930	14.72	
			85%	7.5	166.50	2230	2130	13.39	
			100%	10.2	226.44	2720	2365	12.01	
		T-MOTOR 27*8.8CF	50%	2.6	57.72	1040	1350	18.02	46
			65%	4.8	106.56	1690	1700	15.86	
			75%	6.6	146.52	2080	1900	14.20	
			85%	8.2	182.04	2400	2070	13.18	
			100%	11.2	248.64	2960	2300	11.90	
	T-MOTOR 28*9.2CF	50%	3	66.60	1100	1300	16.52	47	
		65%	5.6	124.32	1850	1675	14.88		
		75%	7.5	166.50	2140	1860	12.85		
		85%	9.5	210.90	2700	2030	12.80		
		100%	13.1	290.82	3270	2250	11.24		
	T-MOTOR 29*9.5CF	50%	3.2	71.04	1330	1300	18.72	48	
		65%	6.2	137.64	2000	1630	14.53		
		75%	8.3	184.26	2500	1820	13.57		
		85%	10.6	235.32	2890	2000	12.28		
		100%	14.1	313.02	3580	2200	11.44		
44.4 (12S)	18x6 wood prop	50%	2.2	97.68	1080	3200	11.06	45	
		65%	3.2	142.08	1410	3600	9.92		
		75%	4.4	195.36	1840	4100	9.42		
		85%	5.7	253.08	2190	4500	8.65		
		100%	7.5	333.00	2750	5000	8.26		
	20x6 wood prop	50%	2.5	111.00	1220	3000	10.99	48	
		65%	3.9	173.16	1690	3500	9.76		
		75%	5.5	244.20	2260	4000	9.25		
		85%	7.3	324.12	2720	4400	8.39		
		100%	9.8	435.12	3430	4900	7.88		
22x6 wood prop	50%	3.2	142.08	1690	2700	11.89	51		
	65%	5.5	244.20	2420	3350	9.91			
	75%	7.7	341.88	3190	3800	9.33			
	85%	10.2	452.88	3760	4200	8.30			
	100%	14	621.6	4700	4500	7.56			

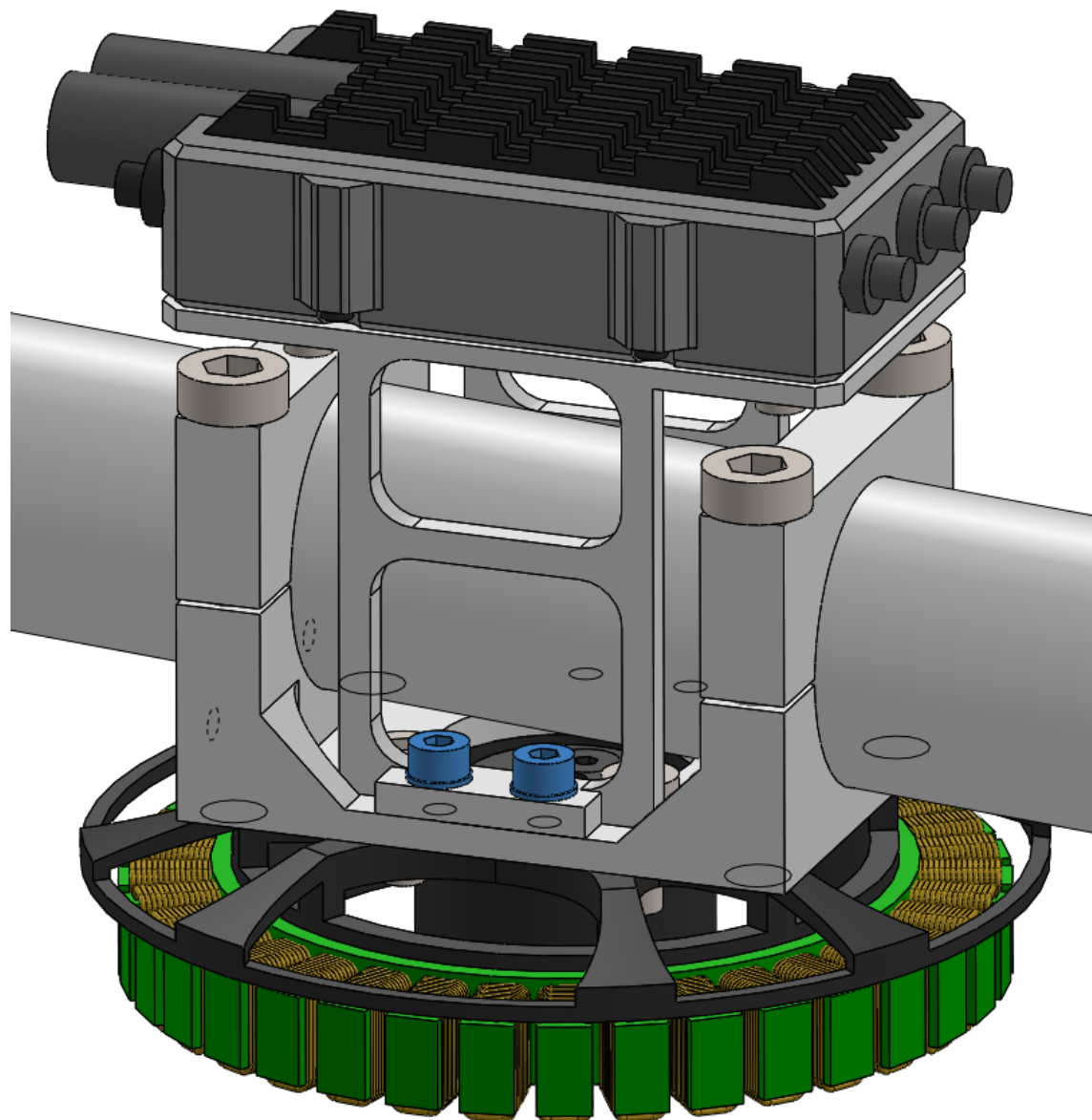
Notes: The test condition of temperature is motor surface temperature in 100% throttle while the motor run 10 min.

Obr. 4.1.2 Parametry motoru T-MOTOR U8 PRO KV 135 [32]

Vzhledem k potřebě vytvoření stabilního pozorovacího stanoviště bude dron většinu letové doby setrávat v jedné pozici tzv. visení. Aby mohl dron co nejdéle letět je nutné zajistit, aby byl dostatečně lehký a motory měly dostatečnou výkonovou rezervu v případě potřeby rychlého přesunu dronu. Pro první prototyp byl vybrán požadovaný tah při visení 75% rozsahu plynu, což odpovídá tahu 3190g z jednoho motoru. Tento tah byl volen vzhledem k předpokladu, že první verze dronu bude těžší než jeho finální varianta. Předpokladem pro větší váhu dronu bylo použití různých senzorů a zařízení na zkoumání jednotlivých částí dronu. Dále se předpokládalo, že ne všechny díly budou dostatečně odlehčeny, nebo vyrobeny z dostatečně lehkých a pevných materiálů.

4.2 Regulátory

Vzhledem k použitým motorům a použitému napětí 44,4V bylo zvoleno řešení použít regulátor, který doporučuje výrobce motoru. Použitý regulátor je typ FLAME 80A. Tento regulátor umožňuje připojení k bateriím 6 až 12S. Regulátor je možné zatížit trvalým proudem 80A a krátkodobě lze odebírat proud 120A. Díky stupni krytí IP55 bylo možné umístit regulátor přímo u motoru bez potřeby ochrany proti tryskající vodě. Výhodou tohoto umístění jsou krátké kabely mezi motorem a regulátorem, a také dobré chlazení regulátoru. Na *Obr. 4.2.1* je zobrazen způsob připevnění motoru a regulátoru k nosné konstrukci.



Obr. 4.2.1 Připevnění motoru a regulátoru k nosné konstrukci

4.3 Vrtule

Dle parametrů udávaných výrobcem motoru bylo zvoleno použití vrtulí vyrobených ze dřeva. Parametry vrtulí a dodavatelskou firmu zvolilo vedení společnosti Aerovision. Vrtule byly vyrobeny a dodány firmou Fiala Prop s.r.o. Pro tento dron bylo zvoleno použití vrtulí 22x6“ a 23x7“.

5 Napájení

Následným krokem po výběru motorů a regulátorů je návrh napájecího systému. Parametry, které musí baterie splňovat, aby byla splněna doba letu, jsou již známy a je nutné provést výběr nejvhodnější baterie. Přenos energie z baterií je nutno měřit a vyhodnocovat, k čemuž slouží napájecí elektronika, která bude následně popsána.

5.1 Baterie

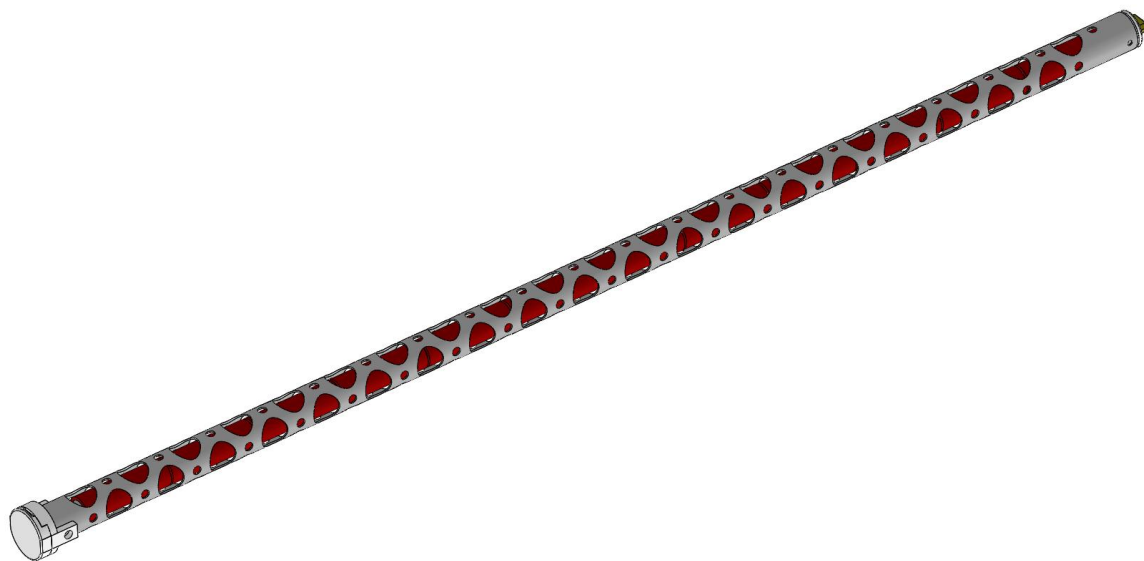
Pro co možná nejdelší let stroje bylo zapotřebí vybrat vhodný typ baterie, který je nejvhodnější z hlediska hmotnosti a kapacity. Jako nejvhodnější typy byly vybrány baterie typu Li-Pol, Li-Ion a Li-FePO₄. Z jednotlivých článků bylo zapotřebí sestavit baterie o napětí 44,4V a kapacitě minimálně 23,1Ah pro dosažení letové doby 45 minut při tahu motorů 75%.

Aby bylo možné jednotlivé typy baterií lépe porovnat, byla vytvořena *Tab. 5.1.1*. V této tabulce zapsány údaje různých typů baterií a vyhodnocen potřebný počet jednotlivých článků. Po porovnání jednotlivých baterií z hlediska hmotnosti je nejvýhodnější řešení použít články typu Li-Ion.

Tab. 5.1.1 Tabulka srovnání různých typů baterií

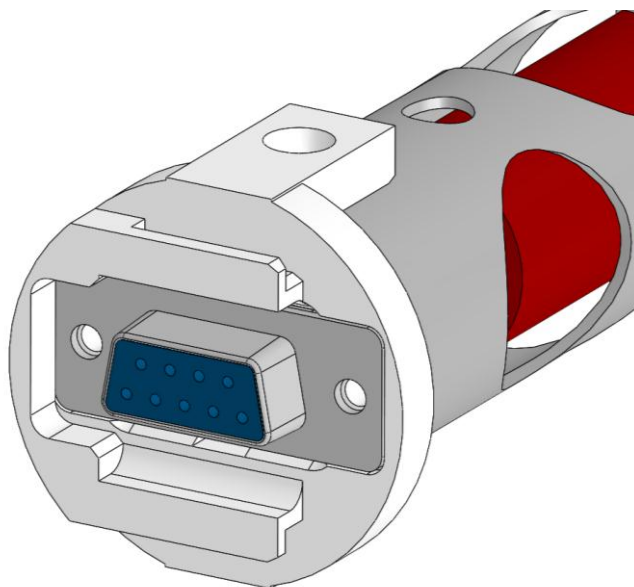
Typ baterie	Li-Pol [33]	Li-Ion [34]	Li-FePO ₄ [35]
Napětí 1čl [V]	3,6	3,6	3,2
Hmotnost 1čl [g]	418	48	76
Kapacita 1čl [Ah]	22,00	3,35	2,50
Požadované napětí baterie [V]	44,4		
Požadovaná kapacita baterie [Ah]	23		
Potřebný počet článků na dosažení napětí	12,33	12,33	13,88
Potřebný počet článků na dosažení kapacity	1,05	6,87	9,20
Celkový počet článků	13	85	128
Hmotnost baterie [kg]	5,39	4,06	9,70

Další výhodou článků Li-Ion, kromě jejich váhy, je jejich tvar a velikost. Na základě tohoto tvaru byly navrženy držáky baterií, ve kterých jsou jednotlivé články umístěny za sebou v sérii 12ks. Tato baterie je zobrazena na *Obr. 5.1.1*. Do stroje je možné umístit libovolný počet těchto baterií v počtu 1 až 8ks. Pro optimální vyvážení stroje je nutné použít 8ks baterií. Celková kapacita všech baterií tak bude 26,8Ah.



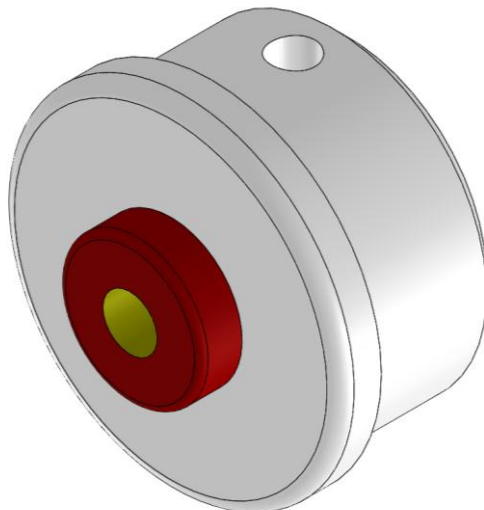
Obr. 5.1.1 Sestava baterie

Jednotlivé baterie je možné umístit do nosných trubek, které tak slouží zároveň jako nosič a ochrana baterií. Díky tomuto řešení baterie nezabírají žádný prostor mimo nosnou konstrukci a nevyžadují montáž speciálních držáků. Po zasunutí baterie do nosných trubek je na vnější straně baterie, která je přístupná, umístěn servisní konektor. Tento konektor je zobrazen na Obr. 5.1.2 a umožňuje měření napětí na jednotlivých článcích, a také měření teploty pomocí dvou termočlánků umístěných u článků.



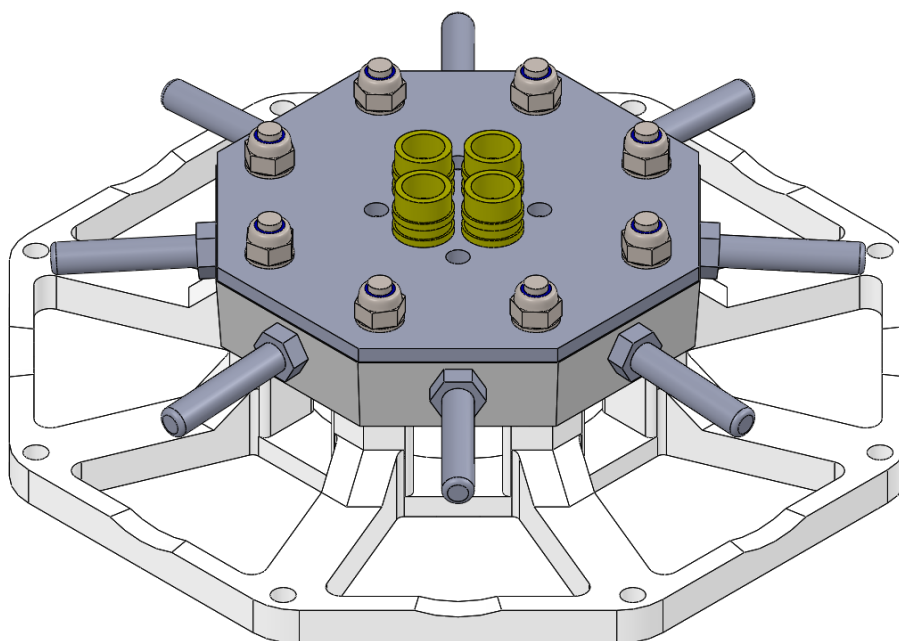
Obr. 5.1.2 Měřící konektor baterie bez krytu

Pro připojení silových vodičů slouží konektor umístěný v přední části baterie. První verze baterie byla bavena konektorem, na který byl připojený pouze kladný pól. Tento konektor je zobrazen na *Obr. 5.1.3*. Záporný pól by připojen na hliníkový nosič baterie.

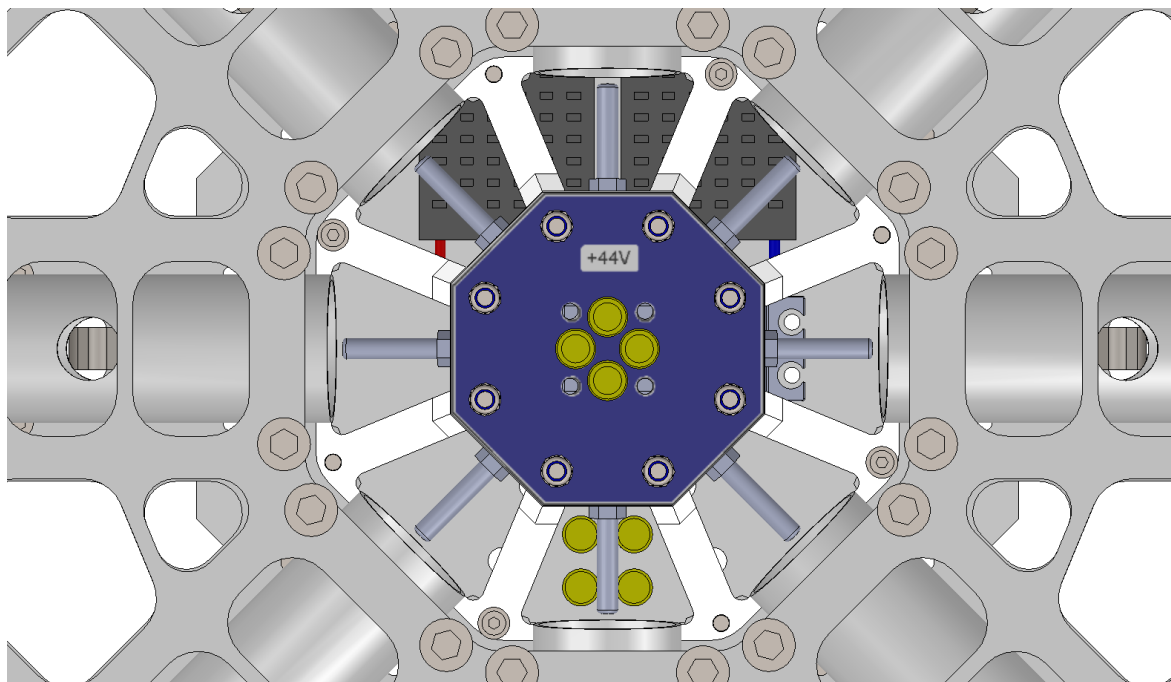


Obr. 5.1.3 První verze silového konektoru na baterii

Po vložení jednotlivých baterií do nosných trubek došlo ke spojení silových konektorů ve středové části konstrukce. Na obrázcích *Obr. 5.1.4* a *Obr. 5.1.5* jsou zobrazeny silové konektory a jejich umístění ve středové části konstrukce.



Obr. 5.1.4 První verze sestavy silových konektorů pro dron



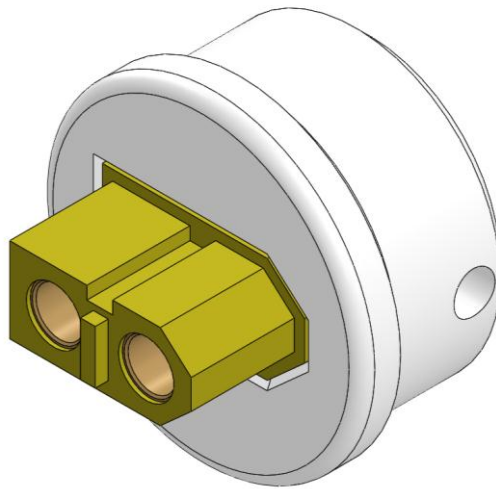
Obr. 5.1.5 Umístění sestavy silových konektorů pro dron v konstrukci

Vodivé spojení záporného pólu zajišťovala ocelová pružina umístěná v blízkosti středové části. Tato pružina vytvářela tlak na nosič baterie a přitlačovala jej k nosné trubce. Záporný pól byl tak na všech vodivých částech nosné konstrukce a vodiče záporného pólu mohly být připojeny pomocí oček kdekoliv na nosné konstrukci. Díky přitlaku pružiny došlo k vytvoření mechanické zábrany proti samovolnému vysunutí baterie z nosné trubky. Výhodou tohoto řešení je, že při vkládání baterie není zapotřebí kontrola jejího natočení.

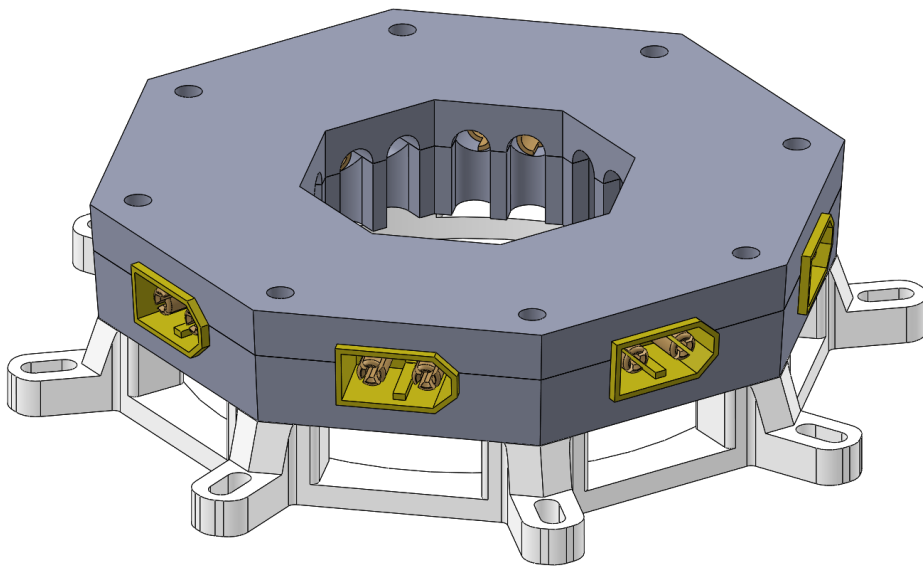
V průběhu zkoušek bylo zjištěno časté opalování silových konektorů ve středové části a nutnost jejich výměny. Další problém představovaly přitlačné pružiny, u kterých docházelo k častému praskání a následnému zasekávání v otvorech nosiče baterií, které byly vytvořeny kvůli dostatečnému odlehčení. Na základě zkušeností získaných s první verzí napájecích konektorů byla vytvořena druhá verze. V této verzi jsou použity jiné konektory, které umožňují připojení obou pólů baterie. Konektory pro baterie a do středové části konstrukce jsou zobrazeny na *Obr. 5.1.6* a *Obr. 5.1.7*. I v druhé verzi konektorů zůstává připojený záporný pól baterie připojený na nosič baterie.

Druhá verze silových konektorů umožňuje samostatné připojení každé baterie k napájecí elektronice. V první verzi toto samostatné spojení nebylo možné, protože všechny silové konektory na středové části byly zašroubovány do bloku vyrobeného

z duralu. Snížení počtu opalů silových konektorů v tomto případě zajišťuje napájecí elektronika.



Obr. 5.1.6 Druhá verze silového konektoru na baterii



Obr. 5.1.7 Druhá verze sestavy silových konektorů pro dron

Nevýhodou použitých Li-Ion článků je jejich dovolený maximální trvalý vybíjecí proud, který má hodnotu 10A na článek. Vzhledem k použití minimálně 7 baterií přestavuje hodnota maximálního trvalého proudu hodnotu 70A. Maximální trvalý proud všech motorů při 100% tahu přestavuje hodnotu 56A. Každá baterie má tak rezervu 2A do odebrání dovoleného maximálního trvalého proudu. Z hlediska zvýšení rezervy a vyvážení konstrukce je vhodné použití 8 baterií.

Další nevýhodu představuje pomalé nabíjení, které při dodržení nabíjecího postupu dle katalogového listu představuje dobu až 4 hodiny. Při potřebě nepřetržitého letu, když je dovoleno pouze přistání stroje na výměnu baterií, je zapotřebí, aby bylo operátorské stanoviště vybaveno dostatečným množstvím baterií a nabíječek.

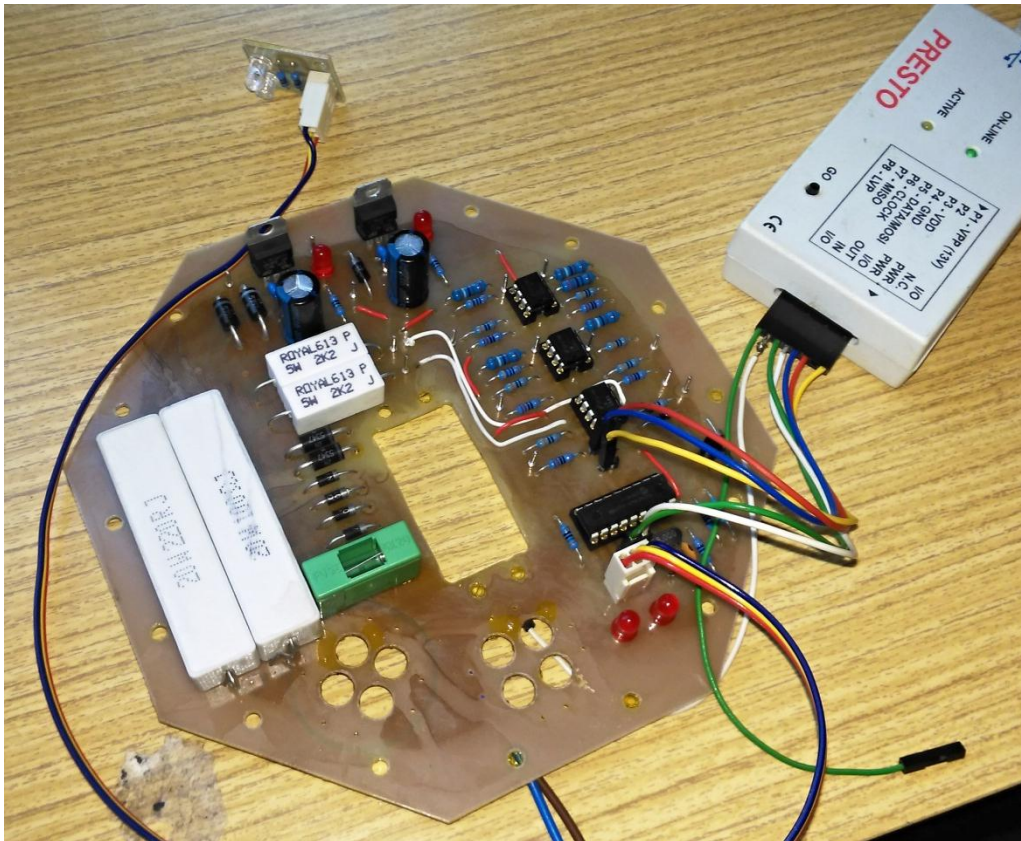
5.2 Napájecí elektronika

Během vývoje dronu pro IZS vzniklo několik návrhů napájecí elektroniky. První zkušební verze byla použita pouze pro prvotní letové testy a obsahovala pulzní stabilizátory snižující napětí baterie na 5V pro řídicí jednotku a na 6V pro podvozkový servomotor. Tato verze byla spojena s bateriemi pomocí první verze silových konektorů a neumožňovala měření napětí baterií. Omezení vysokých proudů při připojování baterií k vybitému meziobvodu regulátorů a stabilizátorů zde nebylo nijak řešeno. Vysoké proudy při nabíjení kapacit v meziobvodu vedly k opalování silových konektorů.

V průběhu návrhu druhé verze silových konektorů vznikl návrh druhé verze napájecí elektroniky. Druhá verze byla vybavena elektronikou pro měření napětí v meziobvodu, a také pro omezení proudů při nabíjení kapacit v meziobvodu. Napětí bylo vyhodnoceno pomocí několika komparátorů a pevně nastavených referenčních napětí. Vyhodnocení napětí provedl řídicí procesor, který poté informaci o stavu baterie zobrazil pomocí dvou LED.

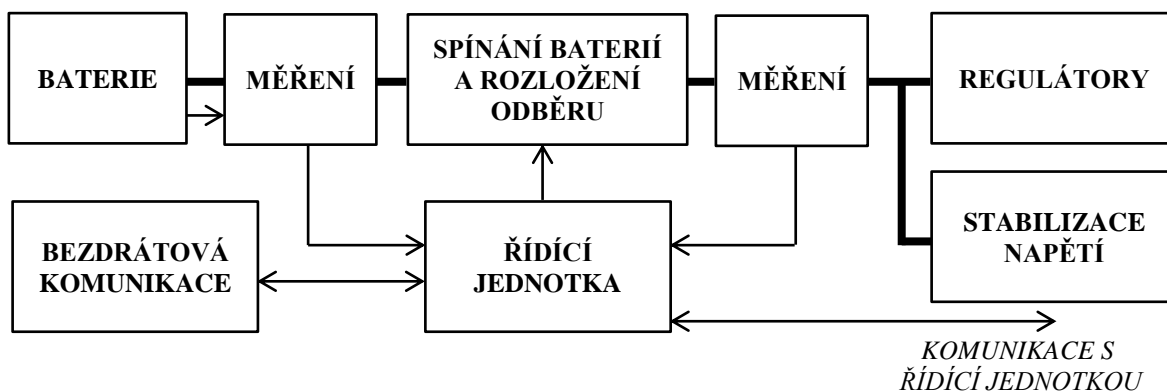
Nabíjení meziobvodu bylo zajištěno pomocí rezistoru a relé. Jakmile dojde k připojení baterie je meziobvod nabíjen přes rezistor, který sníží nabíjecí proud. Napájecí elektronika, je schopna vyhodnocovat napětí v meziobvodu a po překročení určité hranice dojde k sepnutí kontaktu relé, který propojí oba vývody od rezistoru. Z důvodu bezpečnosti je tímto rezistorem vybavena pouze jedna baterie a při poruše napájecí elektroniky nedojde k výpadku napájení dronu. Ostatní baterie jsou spojeny paralelně, jako tomu bylo u předchozí verze. Díky tomuto zapojení není nijak zajištěn rovnoměrný odběr proudu z jednotlivých baterií. Při připojování baterií je nutné vždy jako první připojit baterii ke vstupu vybavenému omezovacím odporem. Po sepnutí kontaktu relé je možné připojit i ostatní baterie. Informace o povolení vložení dalších baterií je zobrazována pomocí stavových LED.

Druhá verze napájecí elektroniky byla vyrobena technologií fotocesty a sestavena z vývodových součástek. Tento druh výroby byl zvolen vzhledem k dočasným možnostem výroby prvního prototypu. Fotografie sestavené desky během ožívování je zobrazena na *Obr. 5.2.1*. Schéma a návrh DPS jsou uvedeny v přílohách A až C.



Obr. 5.2.1 Druhá verze napájecí elektroniky

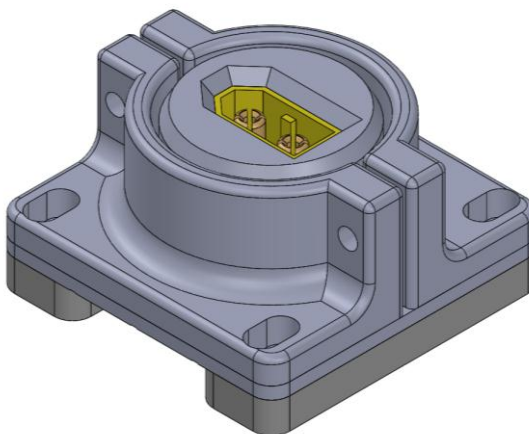
Třetí verze napájecí elektroniky je nutno sestavit z SMD součástek kvůli dostatečné minimalizaci celkových rozměrů. Tato verze již musí umožňovat rovnoměrné rozložení odebíraného proudu mezi jednotlivé baterie. Dalším rozdílem oproti druhé verzi bude možnost měřit proud a napětí každé baterie. Každá baterie bude obsahovat novou verzi silového konektoru, který umožní připojení teplotních senzorů v baterii k napájecí elektronice. V případě nadměrného přehřátí baterie bude mít napájecí elektronika možnost snížit odebíraný proud z baterie, případně baterii zcela odpojit. Dalším vylepšením napájecí elektroniky je přenos naměřených údajů operátorovi stroje. Pilot bude získávat důležité informace vizuálním pozorováním, a také pomocí přesných dat. Bezdrátový přenos také umožní dálkové odpojení baterie při podezření na její poruchu. Blokové schéma této třetí verze je zobrazeno na *Obr. 5.2.2*.



Obr. 5.2.2 Blokové schéma třetí verze napájecí elektroniky

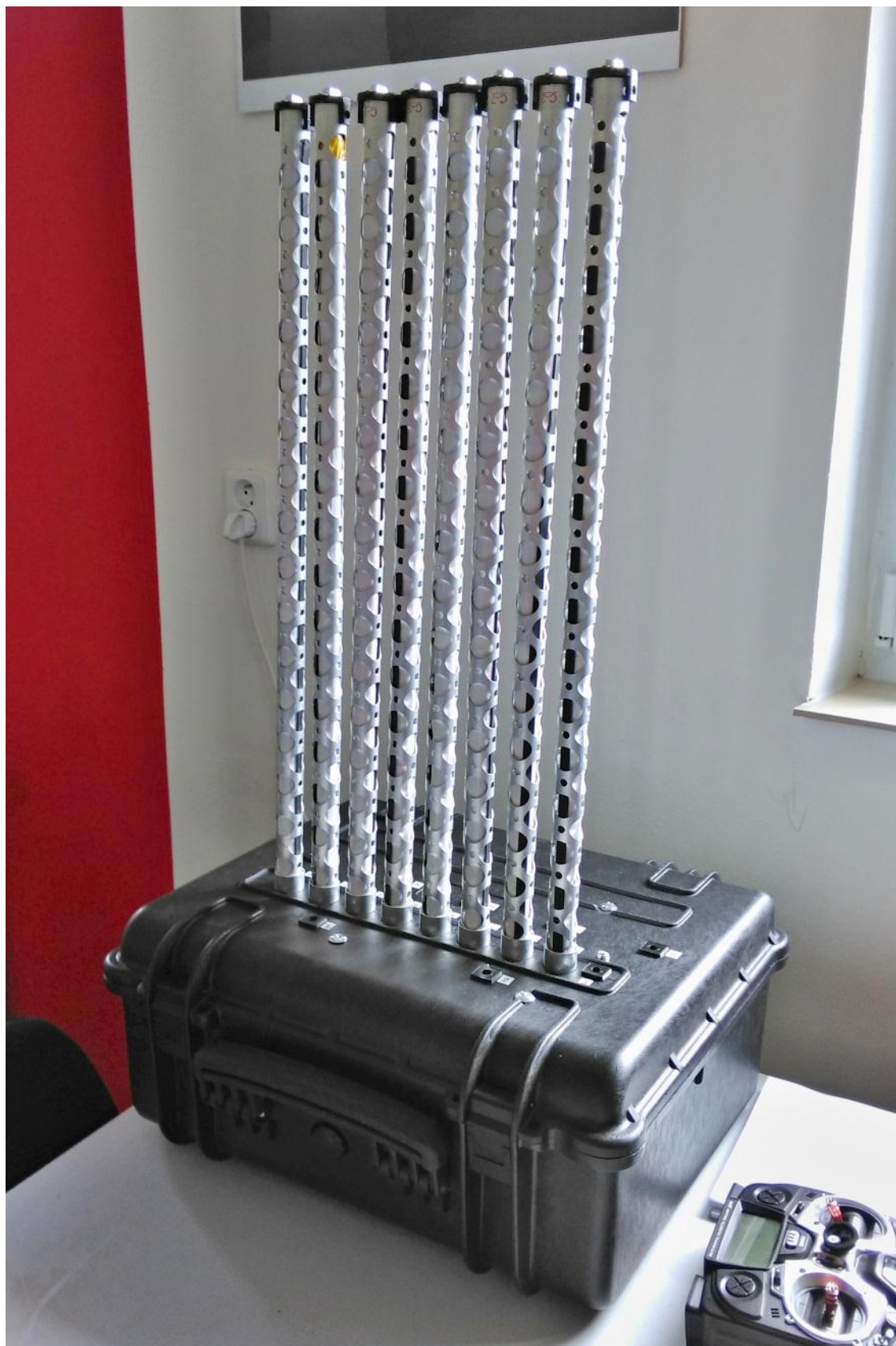
5.3 Nabíječ

Součástí dronu je také nabíjecí stanice pro baterie. Na základě doporučení dodavatele baterií byl použit automatický nabíječ Mascot 3240 LI. Tento nabíječ je schopen nabíjet Li-Ion baterie v rozsahu 1 až 16 článků. Při nabíjení je každá baterie připojena k jednomu nabíječi. Aby byla sestava nabíječů dostatečně kompaktní, a také bylo co nejvíce zjednodušeno připojování jednotlivých baterií, byl navržen speciální nabíjecí box. V tomto boxu jsou umístěny jednotlivé nabíječe a krátké trubky zajišťující vedení baterie při připojování. Na konci každé trubky je umístěn silový konektor a držák vodící trubky. Sestava tohoto držáku a silového konektoru je zobrazena na *Obr. 5.3.1*.



Obr. 5.3.1 Dolní držák trubky se silovým konektorem

Na *Obr. 5.3.2* je zobrazen nabíjecí box s připojenými bateriemi. Stav nabíjení je zobrazen pomocí LED umístěných na každém nabíječi. Tento box má vhodné rozměry a dostatečnou odolnost pro přepravu.



Obr. 5.3.2 Nabíjecí box s bateriemi

6 Řídící elektronika

Vzhledem k potřebě rychlého otestování nového konstrukčního řešení, napájecího systému a letových vlastností bylo zvoleno řešení použít hotovou řídicí jednotku. Při použití běžně prodávané řídicí jednotky není zapotřebí otestování její funkčnosti a spolehlivosti, neboť tyto testy provedl její výrobce. Po dokončení letových testů přichází možnost návrhu vlastní řídicí jednotky, která musí být nejdříve otestována na běžně používaných dronech, a poté na nově vzniklé konstrukci. Z řídicích jednotek, které jsou dostupné na trhu, byly vybrány tři, které měly pro účely testování vhodné vlastnosti, a také byly k dispozici na různých typech dronů na skladě.

Každou řídicí jednotku je zapotřebí nastavit. Hlavní parametry, které se nastavují, jsou počet motorů a jejich rozmístění, pozice řídicí jednotky v dronu, pozice GPS přijímače, zisky gyroskopů a akcelerometrů, volba letových módů, napěťové limity pro varování pilota, výškový a vzdálenostní limit od startovní pozice, ovládání podvozku, ovládání gimbalu, vystřelování padáku. Toto nastavení je prováděno pomocí počítače, který je s řídicí jednotkou spojen pomocí kabelu, nebo bezdrátově pomocí přenosu telemetrie. Řídící jednotky dovolují otestování motorů a senzorů během připojení k počítači. Tato kontrola je velmi důležitá, je zapotřebí ověřit správné připojení motorů a jejich směr otáčení. Dále by měla být provedena kalibrace kompasu a akcelerometru před každým vzletem. Každá řídicí jednotka má kalibrační proceduru odlišnou a musí být provedena přesně podle pokynů v manuálu od řídicí jednotky.

6.1 DJI WOOKONG

Tato řídicí jednotka byla použita pro řízení nově vzniklé konstrukce, jako první. Předchozí stroj, který ovládala, byla multikoptéra s osmi motory a gimbalem. Kompletní sada se skládá z řídicí jednotky, IMU jednotky, GPS přijímače, stabilizátoru napětí a stavové LED. Řídící jednotka podporuje řízení gimbalu, podvozku, automatický návrat na start a automatické přistání. Umožňuje ovládání multikoptéry se čtyřmi až osmi motory. Nastavení řídicí jednotky je prováděno výhradně pomocí počítače připojeného kabelem s řídicí jednotkou.

Po provedení několika vzletů bylo zjištěno, že řídicí jednotka nedovoluje nastavení dostatečně vysokých zisků gyroskopů a dron je při letu velmi nestabilní. Z tohoto důvodu byla řídicí jednotka nahrazena jednotkou DJI A2.

6.2 DJI A2

Jednotka DJI A2 má stejné základní vlastnosti, jako předchozí řídicí jednotky. Její konstrukce je vylepšena nahrazením plastových krytů kovovými. Tato jednotka podporuje ochranu proti selhání motoru. Na rozdíl od předchozí řídicí jednotky má tato jednotka integrovaný přijímač 2,4GHz. Nastavování parametrů je prováděno při připojení k počítači pomocí kabelu.

Další výhodou oproti předchozí jednotce je možnost nastavení zisku gyroskopů pomocí ovládacího prvku na vysílače během letu. Pro každou změnu nastavení tak není nutné připojovat řídicí jednotku k počítači a proces nastavení se výrazně urychlí. Po dokončení nastavení je možné nastavené hodnoty vyčíst a nastavit pevnou hodnotu do jednotky.

Tato řídicí jednotka byla schopna bezpečně ovládat stroj a nebylo zapotřebí její obměny jiným modelem.

6.3 Pixhawk

Přestože předchozí řídicí jednotka měla parametry, které dostačovali pro ovládání stroje, řídicí jednotka Pixhawk dovoluje více možností pro pilotování. Hlavní předností této jednotky je možnost nahrání vlastního softwaru. Dále má tato jednotka zařízení pro přenos telemetrických dat a může být ovládána, nebo nastavena bezdrátově pomocí tohoto přenosu. Díky této možnosti může být dron ovládán pomocí RC soupravy, telemetrického přenosu dat, nebo i jiným způsobem. Tímto jiným způsobem je myšleno například připojení s malým počítačem umístěným v dronu, který bude umožňovat komunikaci pomocí technologie LTE. Pomocí internetu mohou být přenášena data pro řízení, telemetrie a obraz z kamer, nebo z důvodu bezpečnosti bude pomocí internetu přenášen pouze obraz z kamer a telemetrie, data pro řízení budou přenášena jiným způsobem. Tato řídicí jednotka je zobrazena na *Obr. 6.3.1*.



Obr. 6.3.1 Řídící jednotka PIXHAWK [36]

Díky možnosti přenosu telemetrie umožňuje řídící jednotka snadno vytvořit operátorské stanoviště, neboť dodávaný software pro připojení jednotky přímo zobrazuje aktuální údaje. Vzhledem k možnosti nahrání vlastního softwaru je možnost připojení dalších zařízení v dronu, které budou s řídící jednotkou komunikovat a jejichž data budou předávána do operátorského stanoviště. Tyto zařízení mohou být například různé snímače teplot, tlaku, mechanického namáhání a podobně.

Zásadní nevýhodou oproti předchozí řídící jednotce je, že zde není dovoleno nastavování zisků gyroskopů pomocí ovládacího prvku přímo z vysílačky. Každé nastavení je nutné provádět pomocí počítače připojeného kabelem, nebo přes přenos telemetrie. Nastavení řídící jednotky je díky tomu zdlouhavější a složitější než v předchozím případě. Nicméně tato řídící jednotka nabízí mnohem více možností řízení dronu a rozšíření řídící jednotky o sadu snímačů. Také díky této řídící jednotce je dron schopen komunikovat s operátorským stanovištěm víc způsoby. Tato řídící jednotka je nejvíce vhodná pro finální verzi dronu, pokud nedojde k jejímu nahrazení vlastní řídící jednotkou.

7 Řízení

Nejjednodušším způsobem řízení dronu je pomocí RC soupravy s přenosem dat na nosném kmitočtu 2,4GHz. Stav dronu kontroluje pilot pomocí signálu ze stavové LED umístěné v zadní části trupu.

Ovládání dronu je nutno v první fázi vylepšit o přenos telemetrie z dronu k pilotovi. Pilot tak získá více údajů o stavu letounu a je schopen přesněji odhadnout situaci, v jaké se dron nachází. Pro zobrazování přenášených údajů je možné využít obrazovku, umístěnou na vysílače pilota.

Ovládání dronu pomocí RC soupravy je vhodné při letech, které trvají maximálně 45 minut. Pokud by nasazení dronu trvalo delší dobu, pro pilota by to představovalo náročnou činnost. Nejvhodnějším řešením je vytvoření operátorského stanoviště, kde bude místo pro pilota a operátora přídavných zařízení. Toto stanoviště bude chránit pilota a operátora před nepříznivými klimatickými podmínkami. Na tomto pracovišti bude pilot ovládat dron pomocí joysticků a bude moci sledovat jeho stav na obrazovce a vizuálním pozorováním přes okno. Operátorské stanoviště musí být dostatečně vybaveno, aby umožňovalo bezpečný provoz stroje a komunikaci se složkami IZS. V tomto případě by bylo vhodné, aby dron byl ovládán pomocí přenosu telemetrických dat, bezdrátového internetu a jako záložní systém by sloužila RC souprava.

V případě výpadku komunikace by dron byl naprogramován jak na vzniklou situaci reagovat. Pro multikoptéru připadá v úvahu možnost, že by dron zůstal na stejné pozici po určitou dobu, než s ním bude obnovena komunikace. Po uplynutí této doby dojde k automatickému návratu dronu na startovní pozici a jeho automatické přistání.

Během prvních zkoušek nově vzniklého prototypu bylo použito řízení pomocí RC soupravy. Pro zlepšení řízení dronu je nutné použít přenos telemetrických údajů a jejich zobrazení na obrazovce pilota. S možnostmi vytvoření operátorského pracoviště se počítá v dalším vývoji prototypu, zejména při použití řídicí jednotky PIXHAWK.

8 Realizace

Při návrhu konstrukce a výběru vhodných materiálů bylo nutné vzít v úvahu celkovou hmotnost dronu. Jak je uvedeno v kapitole 4.1 pro vizení je vytváří každý motor s příslušnou vrtulí tah 3190g, pro čtyři motory to představuje tah 12 760g. Pro splnění požadavku na dobu letu, musí kompletní dron dosahovat maximální váhy, která je stejná jako tah motorů při 75% plynu, tj. 12,76kg. Vzhledem ke známé hmotnosti motorů (273g/ks) a hmotnosti baterií (735g/ks) by měla být zbývající váha dronu 5,78kg.

8.1 Nosná konstrukce

Pro dosažení dostatečně nízké hmotnosti nosné konstrukce je nutné použít lehké a pevné materiály. Největší podíl hmotnosti má středový svorník, nosné trubky a mechanika podvozku. Středový svorník je vyroben z duralu a co nejvíce odlehčen. Na nosné trubky je nejlepším materiálem karbon, který dosahuje hmotnosti u trubky 28x26mm 160g/1m. Dodání nosných trubek z karbonu představuje závažný problém, protože minimální odebírané množství trubek od dodavatele je 200ks. Při výrobě prototypu, kde je zapotřebí pouze 8ks je vysoce cenově náročné. Z tohoto důvodu byly karbonové trubky nahrazeny trubkami z hliníku. Hliníkové trubky nemají tak dobré pevnostní a hmotnostní vlastnosti, ale pro výrobu prototypu představovali nejvhodnější alternativu. Hmotnost jedné hliníkové trubky je 260g/1m, což je o 100g na 1m délky více než u karbonové trubky. Další velkou zátěž představuje mechanika podvozku. Ta byla vyrobena také z duralu a co nejvíce odlehčena. Vzhledem k možnostem výroby, které byly k dispozici během realizace, bylo toto řešení nejvhodnější. Pro snížení hmotnosti podvozku je nutné, aby podvozkové nohy byly vyrobeny pomocí laminování z uhlíkového kompozitu.

Po kompletním sestavení nosné konstrukce a umístění veškeré potřebné elektroniky dosahovala hmotnost stroje bez baterií 8,5kg. Skutečná hmotnost stroje tak byla o 2,7kg vyšší než původně plánovaná. Rozdíl hmotnosti při použití hliníkových trubek místo karbonových dosahoval 0,8kg. Po umístění baterií dosahovala hmotnost stroje 14,4kg.

8.2 Ochranný kryt

Ochranný kryt, který má být připevněn na nosnou konstrukci, je projektován na výrobu laminováním. Jako nosný prvek má být použita uhlíková textilie. Výroba přesného tvaru krytu je potřeba provádět ve formě, který bude mít přesný tvar, shodující se s vnějším tvarem krytu. Formu je nutno vyrobít pomocí CNC obrábění z kovu a výroba této formy je finančně náročná. Formu není možné dále upravovat. Vzhledem k faktu, že se jedná o výrobu prototypu a kryt se bude muset dále upravovat je výroba kovové formy nevýhodná. V tomto případě bylo zvoleno řešení vytvořit maketu krytu z tvrzeného polystyrenu, který bude mít stejný tvar, jako vnitřek krytu. Na této maketě bude kryt laminován. Oddělení krytu od makety bude provedeno pomocí rozpuštění polystyrenu ředidly. Nevýhodou tohoto řešení je, že výsledný tvar nebude dosahovat takové přesnosti, jako u předchozího řešení a nebude možné provést opětovné laminování na stejné maketě. Největší výhodou tohoto řešení jsou finanční náklady na realizaci.

Ochranný kryt byl vyroben ze dvou částí. Dolní část byla pevně připevněna k nosné konstrukci a horní část byla po obvodu sešroubována s dolní částí. Celková hmotnost krytu dosahovala hodnoty 4kg.

8.3 Postup sestavení

Aby mohl být celý dron sestaven, je nutné dodržet postup sestavení. Nejprve je nutné sestavit mechaniku podvozku. Dalším krokem je umístění nosných trubek do středového svorníku a připevnění silových konektorů do středu svorníku. Na spodní část svorníku se dále připevní napájecí elektronika a připevní se motory s regulátory. Následně je nutné namontovat mechaniku podvozku a provést její předběžné nastavení. Dalším krokem je montáž řídicí elektroniky a kompletní zapojení elektroinstalace. Před montáží krytu je nutné vyzkoušet všechny motory, správnou funkci mechaniky podvozku a napájecí elektroniky. Tyto testy se provádějí bez namontovaných vrtulí z důvodu bezpečnosti. Jakmile jsou testy kompletní, je možné provést testovací let. Po jeho dokončení je možné připevnit ke konstrukci nejprve spodní část krytu a poté i horní část. Než dojde k montáži horní části krytu, je nutné provést přesné nastavení podvozkové mechaniky tak, aby při zavření podvozku byly podvozkové nohy zcela skryty v krytu a jejich vnější tvar se shodoval s tvarem dolního krytu.

8.4 Postup oživení

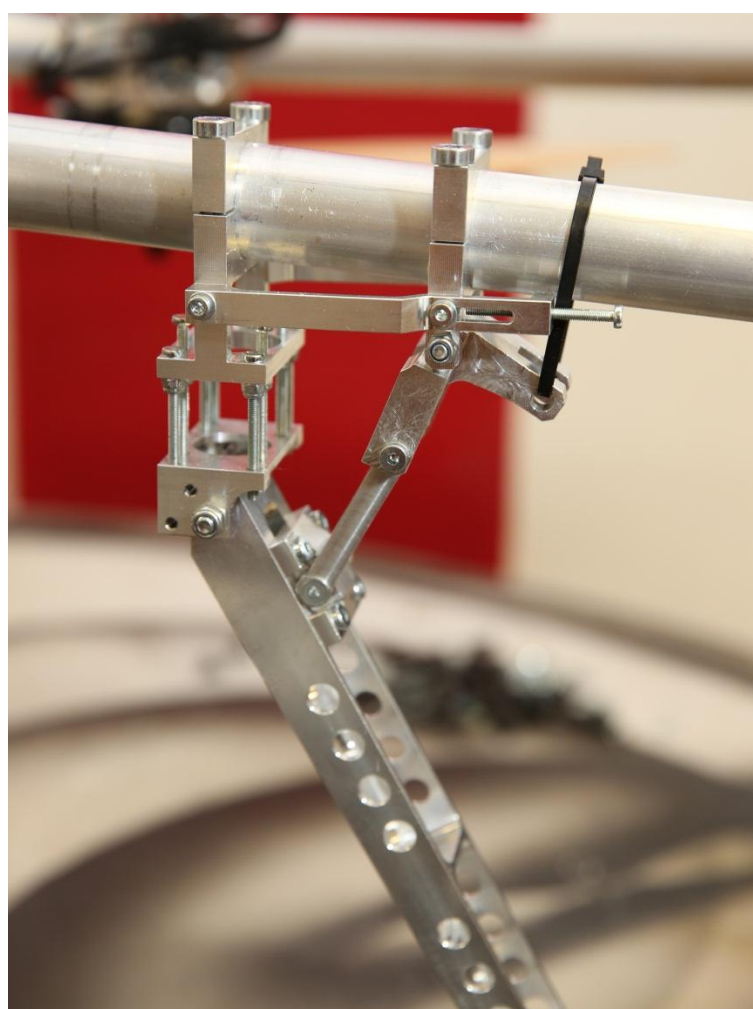
Jakmile je dron připraven k uskutečnění prvních testovacích letů je nutné veškerou elektroniku nastavit. Prvně musí dojít k otestování napájecí elektroniky, zda je schopna dodávat energii do všech potřebných zařízení a zda je schopna stabilizovat a měřit napětí baterií. Dalším krokem je připojení veškeré řídicí elektroniky k napájecí elektronice. Následuje předběžné nastavení zisků gyroskopů, nastavení pozice řídicí jednotky a GPS přijímače. Dále je nutné nastavit počet a rozmístění motorů, ovládací prvky na vysílače pro změnu letových módů a pro ovládání podvozku. Jakmile jsou nastaveny všechny potřebné parametry v řídicí jednotce, je možné uskutečnit první testovací lety stroje. Při prvních letech je nutné přesně nastavit hodnoty zisků gyroskopů a akcelerometrů pro stabilizaci stroje. Po dokončení tohoto nastavení je možné provádět další letové testy, jako je například maximální letová doba, nebo chování stroje za letu.

8.5 Obrázky realizace

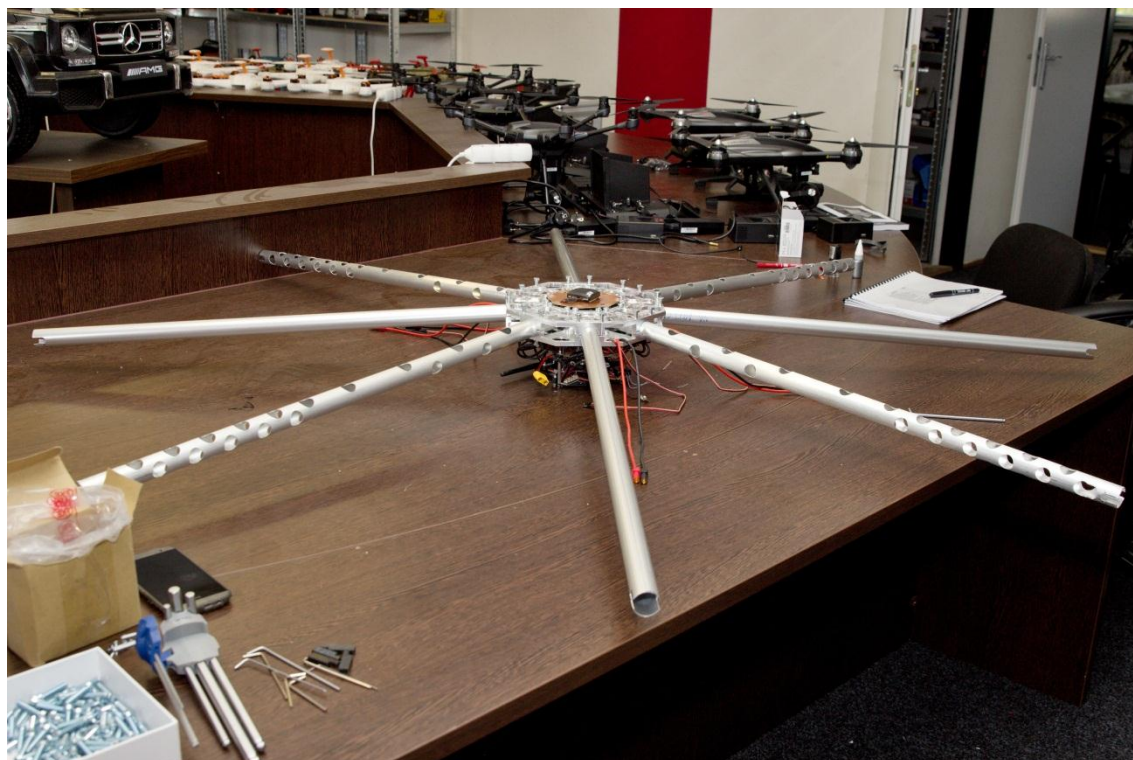
Na následujících několika stranách jsou umístěny obrázky ze stavby dronu. Nejprve byl sestaven mechanismus podvozku, který je zobrazen na *Obr. 8.6.1* a *Obr. 8.6.2*. Dále byly připevněny nosné trubky do středového svorníku, připevněn silový napájecí konektor a napájecí elektronika. Tato část stavby je zobrazena na *Obr. 8.6.3*. Dále došlo k připevnění motorů s regulátory a byla nastavena jejich správná pozice. Držák motoru je zobrazen na *Obr. 8.6.4*. Dron je vytvořen ve dvou variantách, první varianta se skládá z nosné konstrukce a ochranného krytu. Druhou variantu tvoří pouze nosná konstrukce a menší kryt chránící elektroniku. Obě tyto varianty jsou zobrazeny na *Obr. 8.6.5* a *Obr. 8.6.6*. Pohled na montáž dolní části ochranného krytu byla již zobrazena na *Obr. 3.4.1*.



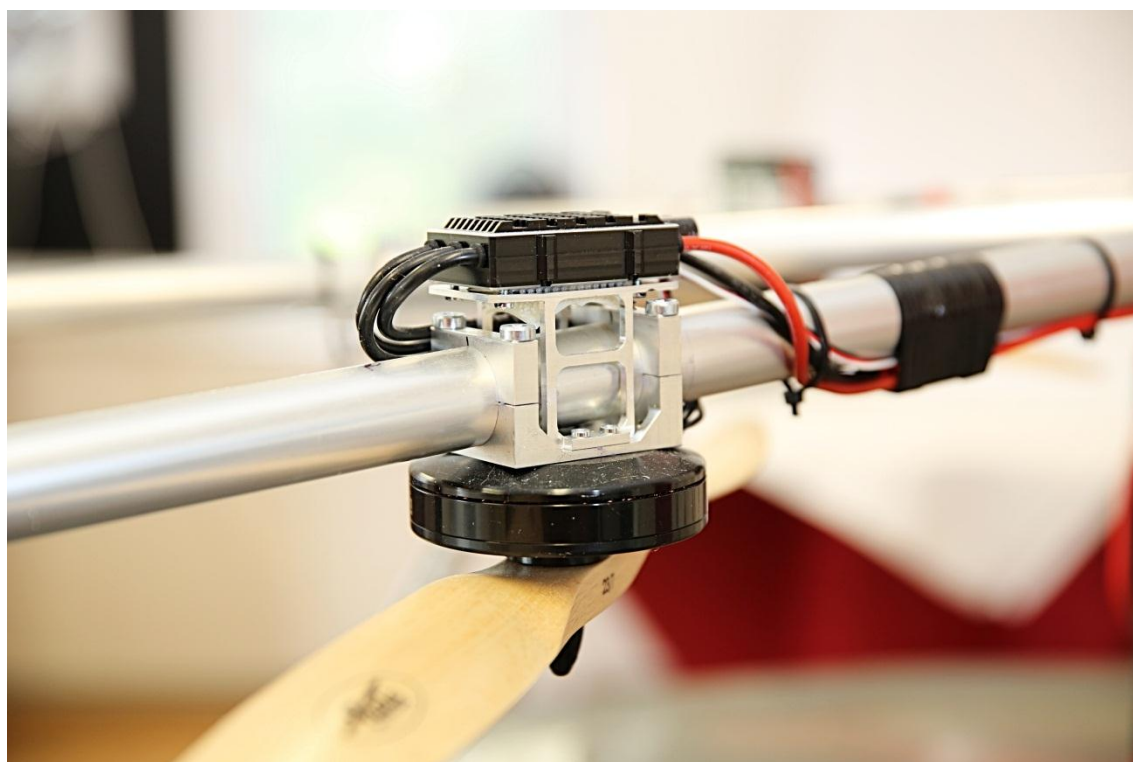
Obr. 8.6.1 Sestavy podvozkové mechaniky



Obr. 8.6.2 Připevňená mechanika podvozku na nosné konstrukci



Obr. 8.6.3 Sestavování středového svorníku a nosných trubek



Obr. 8.6.4 Připevnění motor a regulátor na nosné trubce



Obr. 8.6.5 Kompletní sestava dronu s ochranným krytem



Obr. 8.6.6 Kompletní sestava dronu s krytem elektroniky

Závěr

Diplomová práce popisuje práci na projektu dronu ORBIS ONE. Tento dron byl vyvinut ve společnosti AEROVISION k.s. pro nasazení v IZS. Práce je rozdělena do osmi hlavních částí. První část je zaměřena na teorii ohledně dronů, principy letu a elektroniku. V druhé části jsou blíže specifikovány požadavky, které musí splňovat dron pro nasazení v IZS. Další části se zabývají návrhem konstrukce, napájení a řídicí elektroniky, ovládání a realizací projektu.

Mým hlavním úkolem na tomto projektu byl kompletní návrh mechanické části dronu, na základě designové studie (*Obr. 3.1*). Dále pak návrh napájecího systému, výběr vhodných baterií, jejich uspořádání a umístění v konstrukci dronu. Dalším úkolem byla spolupráce při výběru řídicí jednotky a způsobu ovládání dronu.

Zadaného cíle, tj. doby letu 45 až 60 minut, nebylo dosaženo z důvodu vyšší hmotnosti celého dronu, než bylo navrženo. Toto zvýšení hmotnosti způsobilo použití méně vhodných materiálů na konstrukci. Detailněji tento problém popisuje kapitola 8. Dron dosahoval hmotnosti 14,4kg, což je o 2,7kg více, než bylo navrženo. I přes toto přetížení by měl dron být schopen 38 minutového letu. Při letových zkouškách bylo dosaženo nejdelší doby letu 22 minut.

Na základě takto velkého rozdílu předpokládané a skutečné doby letu bylo provedeno měření tahu motoru s vrtulemi, které byly používány na prvním prototypu. Při obou měřeních byl požadovaný tah motoru 100%. Vrtule 22x6“ dosahovala nejvyššího tahu 3300g a vrtule 23x7“ dosahovala nejvyššího tahu 4000g. Tímto měřením bylo zjištěno, že skutečné parametry použitých vrtulí neodpovídají tabulce uvedené na *Obr. 4.1.2*, ze které byly čerpány počáteční údaje. Vzhledem k nižšímu generovanému tahu byla nucena řídicí jednotka zvýšit jednotlivým motorům požadavek na tah, aby dokázala udržet dron ve stejné výšce a docházelo ke značnému zvýšení odběru jednotlivých motorů a zkrácení doby letu.

Letovou zkoušku nosné konstrukce s ochranným krytem nebylo možné provést. Důvodem byla hmotnost nosné konstrukce s ochranným krytem, která přesahovala možný generovaný tah.

Dalším postupem, kterým by měly být odstraněny všechny nedostatky, bude v první řadě použití jiných vrtulí, se kterými bude dosaženo požadovaných parametrů. Dále pak musí dojít k odlehčení celé konstrukce a použití projektovaných materiálů. Na základě získaných zkušeností při realizaci prvního prototypu, je nutné, aby verze dronu s ochranným krytem byla řešena tak, že ochranný kryt bude současně plnit funkci nosné konstrukce i ochranného krytu. Toto řešení je nutné z hlediska snížení celkové hmotnosti.

Řídící a napájecí elektronikou se zabývají kapitoly 5 a 6. V prvním prototypu bylo postupně použito několik řídicích jednotek a napájecí elektroniky. Elektronika, která byla použita, umožňovala uskutečnit první letové testy. Aby bylo možné realizovat operátorské stanoviště, jak je popsáno v kapitole 7, je nutné, aby byla veškerá elektronika v dronu zdokonalena a umožňovala vzájemnou komunikaci.

Seznam literatury a informačních zdrojů

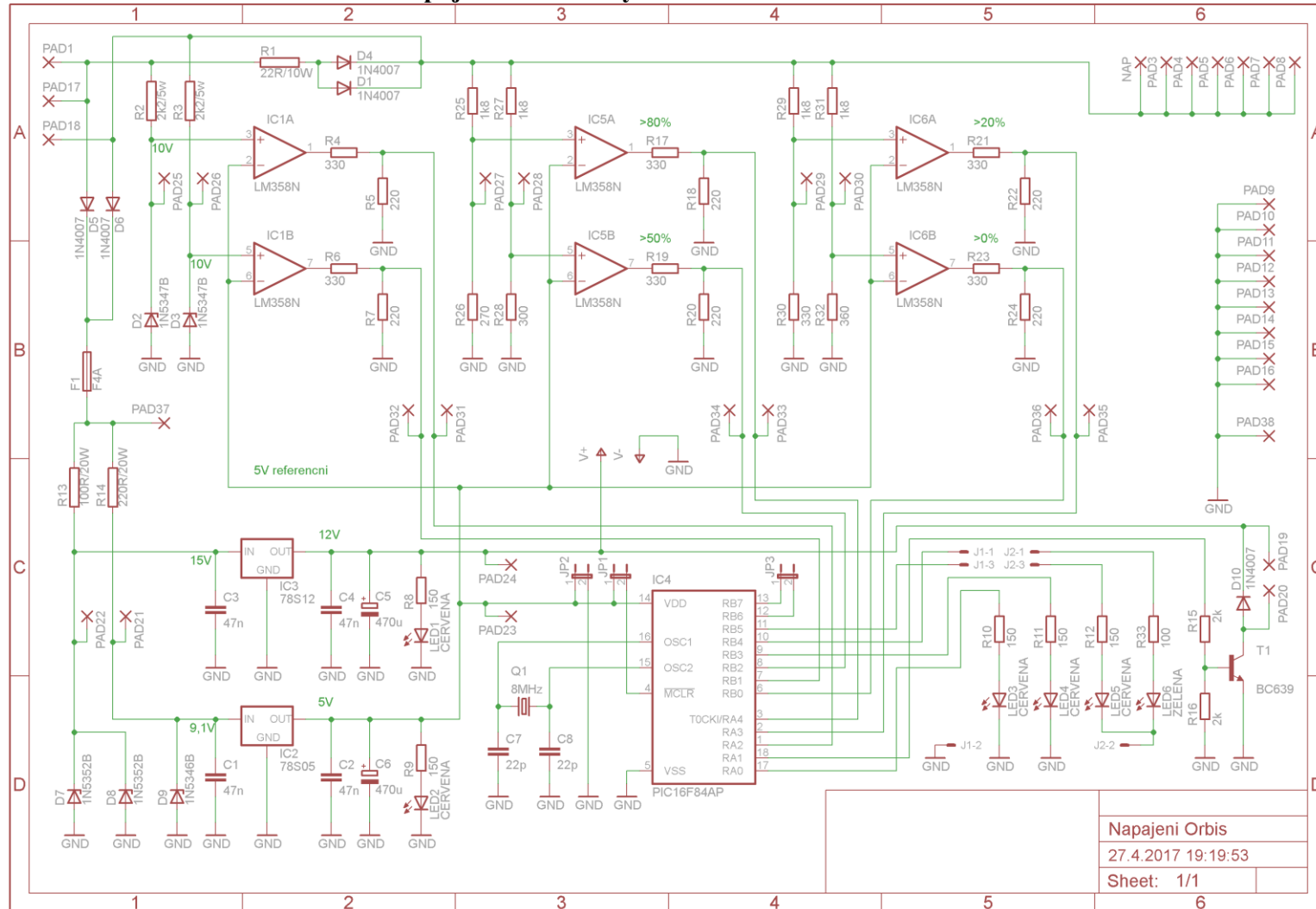
- [1] *ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ: Co je to bezpilotní letadlo, bezpilotní systém, model letadla?* [online]. [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/co-je-to-bezpilotni-letadlo-bezpilotni-system-model-letadla>
- [2] *REDDIT: Kettering Bug: An unmanned "aerial torpedo" from World War I* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: https://www.reddit.com/r/WeirdWings/comments/559wxi/kettering_bug_an_unmanned_aerial_torpedo_from
- [3] *Hartzell Propeller Inc.: THE EARLY HISTORY OF UAV'S* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://hartzellprop.com/the-early-history-of-uavs>
- [4] *Natural Wonders: Drones: A Photo History* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.naturaltopwonders.com/2012/06/drones-photo-history.html>
- [5] *Natural Wonders: Drones: A Photo History* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.naturaltopwonders.com/2012/06/drones-photo-history.html>
- [6] *DJI Wiki: A2 Mixer Type Supported* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://wiki.dji.com/en/index.php/A2_Mixer_Type_Supported
- [7] *AltiGator: MINI 3D PRO 3-AXIS FEIYU-TECH GIMBAL FOR UAV* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: https://drones.altigator.com/gimbals-camera-mounts-gopro-gimbals-c-5_267.html?pg=store
- [8] *Amazon: Coolplay UDI U817 U817C U817A U818A Clockwise Motor & Anti-Clockwise Motor with Metal Gear Spare Parts for Udirc RC Quadcopter* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Coolplay%C2%AE-U817A-Clockwise-Anti-Clockwise-Quadcopter/dp/B01AD7EPN2>
- [9] *GetFPV: Tiger Motor U8-13 135kv U-Power Professional Motor* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.getfpv.com/motors/tiger-motor-u8-13-135kv-u-power-professional-motor.html>
- [10] *FPVHome: DALRC SP Racing F3 Open Source Main Control Unit* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.fpvhome.com/index.php/f3-open-source-main-control-unit.html>
- [11] *DroneOmega: How GPS Drone Navigation Works* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.droneomega.com/gps-drone-navigation-works>
- [12] *Wonderful Engineering: 10 Best GPS Modules For Engineers And Hobbyists* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://wonderfulengineering.com/10-best-gps-modules-for-engineers-and-hobbyists/>
- [13] *HW server s.r.o.: Integrované MEMS GYROSKOPY* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- [14] *Parallax Inc.: Gyroscope Module 3-Axis L3G4200D* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.parallax.com/product/27911>
- [15] *Engineering360 News Desk: Specifying an Accelerometer: Function and Applications* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://insights.globalspec.com/article/1263/specifying-an-accelerometer-function-and-applications>

- [16] *StrainSense Ltd: Precision Micro Barometer Module* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.strainsense.co.uk/products/pressure-sensors-barometric-altitude/precision-micro-barometer-module-ms5611>
- [17] *SparkFun Electronics: SparkFun HMC6343 Breakout* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/12916>
- [18] *Instructables: Easy Ultrasonic 4-pin Sensor Monitoring (hc-sr04)* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Easy-ultrasonic-4-pin-sensor-monitoring-hc-sr04/>
- [19] *DIYPhotography: DJI UNVEILS PHANTOM 4 DRONE, COMPLETE WITH OBJECT AVOIDANCE SENSORS AND TWO NEW AUTONOMOUS FLIGHT MODES* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.diyphotography.net/dji-unveils-phantom-4-drone-complete-with-object-avoidance-sensors-two-new-autonomous-flight-modes/>
- [20] *RobotShop inc.: Hokuyo UTM-30LX-EW Scanning Laser Rangefinder* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.robotshop.com/uk/hokuyo-utm-30lx-ew-scanning-laser-rangefinder-eu.html>
- [21] *Amazon: Parrot AR.Drone 2.0 Flight Recorder* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.amazon.co.uk/Parrot-AR-Drone-2-0-Flight-Recorder/dp/B00DAL6D3Y>
- [22] *Yatego: Yuneec Typhoon H Pro Version* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://www.yatego.com/plentino/p,576de96491c01,493fbdc1692db2_4,yuneec-typhoon-h-pro-version-intel-realsense-rucksackset-2x-akku-wizard-4k-cgo3-st16-fernsteuerung
- [23] *Rise Above: Tmotor Flame 80A ESC 6-12S Lipo 600hz* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.riseabove.com.au/products/tmotor-flame-80a-esc-6-12s-lipo-600hz.html>
- [24] *Brushlessgimbal: APM2.6 2.5 2.52 power module/current module with 5.3VDC BEC* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://brushlessgimbal.ca/Auto-Pilot-Controller/APM2.6-2.5-2.52-Power-Module-Current-Module-With-5.3VDC-BEC>
- [25] *FPVphoto: Co je FPV létání ?* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.fpvphoto.cz/index.php/co-je-fpv-letani/>
- [26] *Gearbest: FPV Set TS5828 5.8GHz 32 Channel 600mW Transmitter + 600P CM211 HD Camera* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://www.gearbest.com/fpv-system/pp_226583.html
- [27] *Petr Kunický PK-modelář: Typhoon H mechanismus zatahovacího podvozku* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.pkmodelar.cz/multikoptery-nahradni-dily-yuneec/typhoon-h-podvozkova-noha-yuntyh109svc>
- [28] *BATTEX - Abeceda baterií a akumulátorů: Základní charakteristiky* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/zakladni-charakteristiky>
- [29] *BATTEX - Abeceda baterií a akumulátorů: Nabíjení lithiových akumulátorů* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickyh-akumulatoru/nabijeni-lithiovyh-akumulatoru>

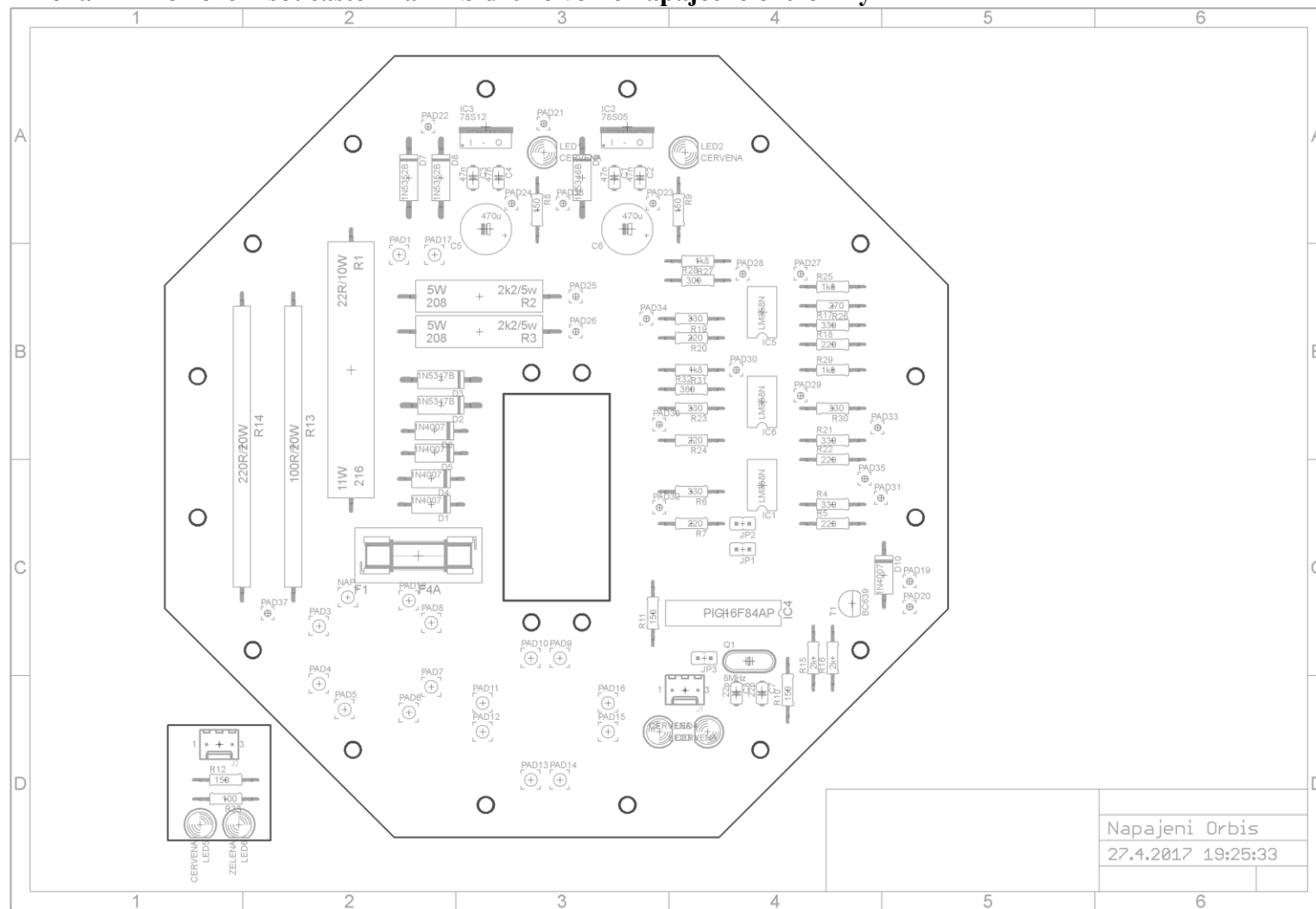
- [30] PECKA MODELÁŘ: *GENS ACE LIPO TATTU serie - 6S 16000 mAh 22,2V* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.peckamodel.cz/produkt/rc-modely-a-prislusenstvi/akumulatory/aku-li-poly/softcase/od-6001mah/6s/ta-15c-16000-6s1p-gens-ace-lipo-tattu-serie-6s-16000-mah-15c>
- [31] *GetFPV LLC.: Tiger Motor U8-13 Pro 135kv U-Power Professional Motor* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.getfpv.com/motors/tiger-motor-u8-13-pro-135kv-u-power-professional-motor.html>
- [32] *T-motor: U8 Pro* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://www.rctigermotor.com/html/2013/Efficiency-Type_1219/176.html
- [33] PECKA MODELÁŘ: *GENS ACE LIPO TATTU serie - 6S 22000 mAh 22,2V 6SIP(25C)* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.peckamodel.cz/produkt/rc-modely-a-prislusenstvi/akumulatory/aku-li-poly/softcase/od-6001mah/6s/ta-25c-22000-6s1p-gens-ace-lipo-tattu-serie-6s-22000-mah-25c>
- [34] *BATTEX: NCR18650GA* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://shop.battex.cz/vyrobky/NCR18650GA.php>
- [35] *BATTEX: ANR 26650MI-B* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://shop.battex.cz/vyrobky/ANR26650.php>
- [36] *Dragon Link: PixHawkTelemetrySetup* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.fpvpro.com/dragonlink/support/v3-advanced/pixhawktelemetrysetup/>

Přílohy

Příloha A – Schéma druhé verze napájecí elektroniky



Příloha B – Rozložení součástek na DPS druhé verze napájecí elektroniky



Příloha C – Rozložení vodivých cest DPS druhé verze napájecí elektroniky

