

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA TECHNOLOGIE STAVEB



DIPLOMOVÁ PRÁCE

VYPRACOVAL:

BC. JIŘÍ HAUER

AKADEMICKÝ ROK:

2023/2024

VEDOUCÍ PRÁCE:

ING. MICHAL KOVÁŘÍK

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Hauer</u>	Jméno: <u>Jiří</u>	Osobní číslo: <u>484389</u>
Zadávací katedra: <u>K122 - Katedra technologie staveb</u>		
Studijní program: <u>SI - Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor/specializace: <u>L - Příprava, realizace a provoz staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Možnosti využití dronů pro vizuální kontrolu staveb v prostorově stísněných podmínkách</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Possibilities of using drones for visual inspection of buildings under spatially constrained conditions</u>	
Pokyny pro vypracování: Motivace. Rešerše technologií pro vzdálenou inspekci staveb. Rešerše bezpilotních letadel se zaměřením na stavebnictví Hypotéza. Návrhové parametry dronu pro pohyb v prostorově stísněných podmínkách Návrh schématu a konstrukčního řešení dronu a přidružených systémů. Experimentální ověření funkčnosti navrženého dronu Diskuse výsledků Závěr	
Seznam doporučené literatury: 1. Büchi, Roland. Brushless Motors and Controllers. s.l. : Books On Demand, 2012. 2. Habrnal, L. Možnosti rozvoje a zajištění bezpečnosti dálkově řízených letadel RPAS v ČR. Brno, 2015. Diplomová práce. 3. Christian M. Mollica. FPV Flight Dynamics: Mastering Acro Mode on High-Performance Drones. 2020	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Michal Kovářik</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>25.9.2023</u> Termín odevzdání DP v IS KOS: <u>8.1.2024</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího bakalářské práce Ing. Michala Kováříka. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne 5.1. 2024

Bc. Jiří Hauer

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Michalovi Kováříkovi za jeho cenné připomínky, rady a odborné vedení.

Možnosti využití dronů pro vizuální kontrolu staveb v prostorově stísněných podmínkách

Possibilities of using drones for visual inspection of buildings under spatially constrained conditions

Anotace

Hlavním cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat bezpilotní letadlo (kvadrokoptéra), které bude v praxi schopno pořizovat letecké snímky ve stísněných a nepříznivých podmínkách.

První část diplomové práce je věnována vývoji a rozdělení bezpilotních prostředků, jejich různého využití ve stavebnictví i mimo něj, a to dle typu konstrukce a nesené technologie. Závěr této části je zaměřen na aktuální řešení bezpilotních letadel pro inspekci ve stísněných prostorech a je zde provedena analýza dostupných možností, kterou jsem se inspiroval k sestrojení vlastního prostředku.

Druhá část této práce je čistě praktická, věnována vývoji, prototypování a konstrukci vlastní inspekční koptéry. Jsou zde zdokumentovány provedené testovací lety, při kterých byl proveden sběr dat a následné zpracování nutné pro ověření použitelnosti navržené koptéry.

Klíčová slova:

Bezpilotní letadlo, UAV, Dron, Koptéra, Inspekční koptéra, Prototypování, Analýza a testování dronů, Stavebnictví, Inspekce ve stísněných prostorách, Letecké snímkování, Letecká fotogrammetrie, 3D mapování, LiDAR, Termokamera

Abstract:

The main goal of this work is to design and construct an unmanned aircraft (drone) that will be able to take aerial photographs in cramped and adverse conditions.

The first part of the thesis is devoted to the development and distribution of unmanned vehicles, their various uses in the construction industry and beyond, according to the type of construction and the technology carried. The conclusion of this part is focused on the current solution of unmanned aircraft for inspections in confined spaces, and an analysis of the available options is carried out here, which inspired me to build my own device.

The second part of the thesis is purely practical, dedicated to the development, prototyping and construction of the own inspection copter. The test flights carried out during which data collection was carried out and the subsequent processing necessary to verify the usability of the proposed copters are processed here.

Keywords:

Unmanned Aircraft, UAV, Drone, Helicopter, Inspection Helicopter, Prototyping, Drone Analysis and Testing, Construction, Confined Space Inspection, Aerial Photography, Aerial Photogrammetry, 3D Mapping, LiDAR, Thermal Imaging

Obsah

1. Úvod	14
2. Rešerše zadané problematiky	15
Pojem bezpilotní letadlo	15
Historický vývoj využití bezpilotních letadel	15
První sériově vyráběné bezpilotní letadlo.....	17
Rozvoj civilních bezpilotních prostředků.....	18
Rozdělení dle využití dronu	21
Rozdělení dle konstrukce dronu	26
Využití dronů ve stavebnictví	30
3. Hypotéza	44
4. Návrhové parametry dronu pro pohyb v prostorově stísněných podmínkách	45
Pořízení potřebných komponent	46
a) Rám	46
b) Řídící jednotka - FC.....	47
c) GNSS modul.....	48
d) LiDAR s Optical Flow senzorem	49
e) Regulátor otáček motorů - ESC	50
f) Motory	51
g) Video vysílač – VTX.....	52
h) Video přijímač – VRX	54
i) RC Přijímač - RX	56
j) RC Vysílač - TX	58
k) RC Vysílačka – RC Controller	60
l) Ochranná klec	62
m) Baterie.....	64
5. Stavba koptéry - metodika	67
a) Montáž rámu.....	68
b) Montáž motorů	69
c) Připájení regulátoru otáček motoru	70
d) Umístění řídicí jednotky	71
a) Připojení RC přijímače	72
b) Připojení GNSS modulu	73

c)	Připojení LiDAR s Optical Flow senzorem	74
d)	Připojení video vysílače	75
e)	Montáž gimbálu kamery	76
f)	Osvětlení	77
g)	Kompletace rámu	78
h)	Ochranná klec	79
i)	Baterie	80
	Nastavení koptéry – metodika	81
a)	Nahrání softwaru do řídicí jednotky	81
b)	Nastavení portů a periférií	82
c)	Konfigurace senzorů	83
d)	Kalibrace akcelerometru a kompasu	84
e)	Kalibrace Optical Flow senzoru	85
f)	Nastavení GNSS modulu	86
g)	Nastavení RC přijímače a vysílače	88
h)	Přiřazení modes a funkcí RC vstupům	89
i)	Spárování video vysílače a nastavení OSD elementů	90
j)	Nastavení motorů a serv	91
6.	Experimentální ověření funkčnosti navrženého dronu	93
7.	Diskuse výsledků	100
8.	Závěr	101

1. Úvod

K FPV (First Person View) dronům jsem se dostal v roce 2018, v tu dobu to byla moje první zkušenost s drony vůbec, tehdy jsem FPV drony bral jen jako koníček, aktuálně se pro mě FPV drony stávají spíše nástroje, ať už pro kinematografické nebo jiné účely. Hlavní motivací pro zpracování této diplomové práce byla snaha o využití mých dosavadních zkušeností k sestavení konkurence schopného stroje s menšími pořizovacími náklady než u komerčních řešení, který bude plně použitelný pro vzdálenou inspekci staveb, konstrukčních prvků a technologií staveb v těžko přístupných, nepřístupných nebo pro pracovníky nebezpečných prostor.

2. Rešerše zadané problematiky

Pojem bezpilotní letadlo

Termín „dron“, jenž v překladu do českého jazyka znamená včelí trubec, byl poprvé použit v roce 1935, při nasazení v americkém námořnictvu, a to na počest jednoho z prvních dálkově řízených letadel, jehož jméno bylo „Queen Bee“ (v překladu Včelí Královna). Tento výraz můžeme najít v Americkém vojenském lexikonu z té doby. Termín dron byl výhradně používán až do konce války ve Vietnamu roku 1975, kdy byl nahrazen termínem RPV (remotely piloted vehicle), což v překladu znamená dálkově pilotovaný letecký dopravní prostředek. V roce 1990 pak byl termín RPV zaměněn za termín UAV (unmanned aerial vehicle), tedy bezpilotní letoun, který je takto používán až dodnes.

Kolem roku 2000 byl ještě mezi používané výrazy zařazen termín UAS (unmanned aerial system), tedy bezpilotní systém. UAV je letoun, který je vzdáleně řízen pilotem, pilot tedy nesedí uvnitř, ale řídí letoun ze země. UAV ale mohou také létat automaticky, a to dle předem nadefinovaných letových plánů nebo pomocí složitějších dynamických autonomních systémů, díky kterým se tak UAV může bezpečně dostat mimo vizuální dosah pilota. UAS pak zahrnuje nejen letoun jako takový, ale i kontrolní a řídicí pozemní komunikační systém spojující tyto dvě technologie.

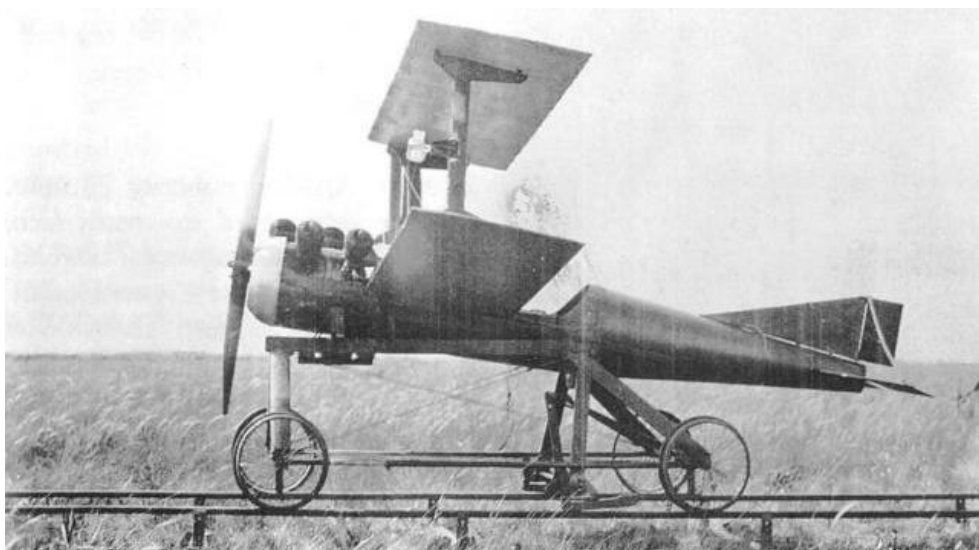
Při zmiňování výrazů UAV a UAS je důležité také nezapomenout na pojem dron, který je v poslední době možné slyšet velmi často. Bohužel je však tento termín velmi často vnímán spíše negativně, jelikož se ve většině případů jedná o spojitost s vojenskými účely. Tento výraz referuje nejen k výše zmiňovaným UAV a UAS, ale i AUV neboli nezávislému podvodnímu prostředku a i mnohým dalším. Dron je tedy výraz obecnějšího rozsahu: „Dopravní prostředek, který je schopný jízdy bez člověka na palubě, je dron. Může být člověkem ovládán dálkově, nebo může být schopen autonomního provozu“.

[1]

Historický vývoj využití bezpilotních letadel

První zmínky o bezpilotních letadlech (UAV) sahají více než století zpět. Již v roce 1918, tedy na konci první světové války, se objevily informace o stroji, který bychom dnes nazvali "dron". Byl vyvinut pro americkou armádu a dostal jméno "Kettering bug". Byl to první stroj svého druhu, který byl schopen autonomního letu. Za jeho tvorbou stál vynálezce a obchodník Charles F. Kettering, a v jeho vývoji mu asistoval jeden z bratrů

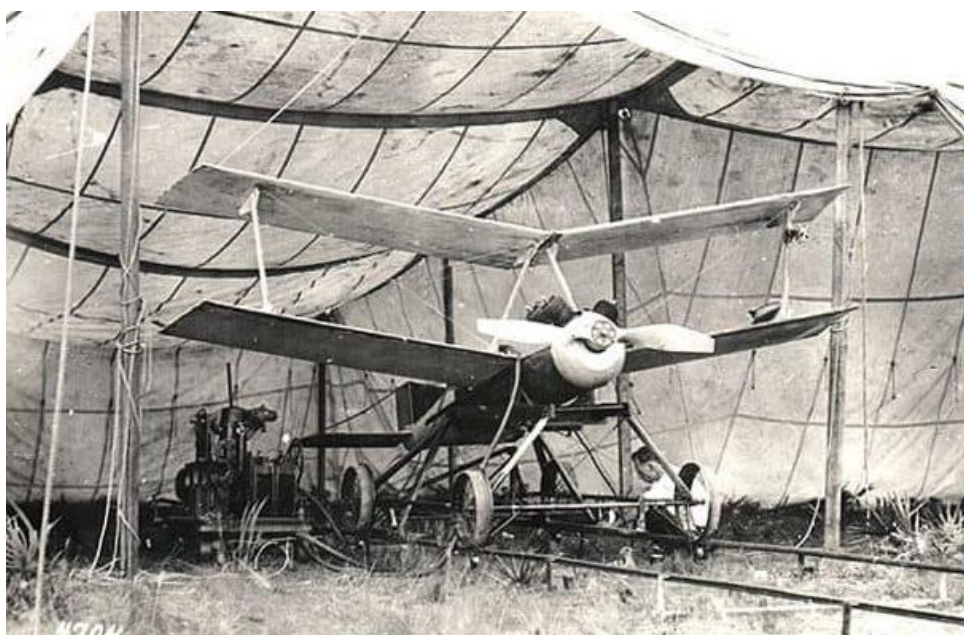
Wrightových, považovaných za zakladatele moderního letectví. Plánovalo se, že jejich továrna bude stroj masově produkovat pro válečné potřeby v konfliktu s Německem.



Obrázek 1 - Kettering bug

V podstatě šlo o "letící torpédo" s motorem Ford o výkonu 40 koní. Mohl dosáhnout maximální rychlosti 80 km/h s doletem až 120 km. Hlavním omezením bylo, že po startu už nebylo možné letoun dále řídit. Mechanici před startem určili, kolik otáček motor udělá na základě vzdálenosti cíle a podmínek, jako je síla a směr větru. Po uplynutí této doby se motor automaticky vypnul a dron se s náloží srazil k zemi. Kvůli skončení války a obavám ze selhání motoru nad spojeneckým územím však "Kettering Bug" nebyl nikdy ve válce nasazen. Existence tohoto projektu zůstala skrytá až do druhé světové války.

[2]



Obrázek 2 - Kettering bug

První sériově vyráběné bezpilotní letadlo

V 30. a 40. letech minulého století britské královské letectvo využívalo dálkově řízené dvouplošníky Tiger Moth, často označované jako Queen Bee. Tyto stroje byly používány jako vzdušné cíle pro trénink protivzdušné obrany. Sloužily k tréninku střelby z bojových letounů a testování radiolokační technologie. Stroj Tiger Moth byl vybrán kvůli své vynikající stabilitě, což byl ideální základ pro konstrukci Queen Bee. Queen Bee mohl být ovládán z pozemního stanoviště, z lodi či z jiného letadla. Ovládání bylo založeno na jednoduchých otočných potenciometrech.



Obrázek 3 - Queen Bee s ovládacím pultem

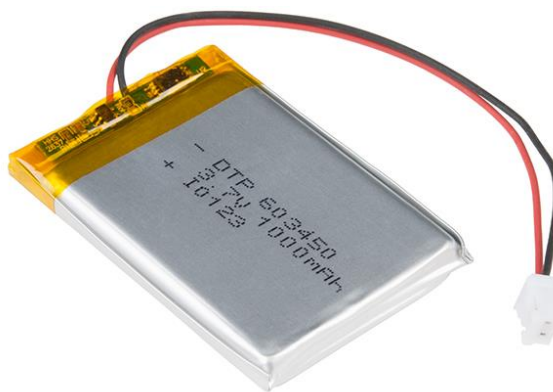
Queen Bee měl tříkanálové ovládání, které umožňovalo řízení výšky, směru a otáček motoru. Pokud se přerušil signál, letoun přešel do neutrálního režimu a letěl dále, dokud mu nedošlo palivo. Měl i systém pro automatické přistání, který reagoval na změnu impedance, když se anténa, která visela pod letadlem dotkla země. Tento systém následně inicioval postup pro bezpečné přistání. V dnešní době by byl tento letoun považován za stroj s jednoduchou "Fail Safe" funkcí, o které si ještě povíme. [2]



Obrázek 4 - Queen Bee

Rozvoj civilních bezpilotních prostředků

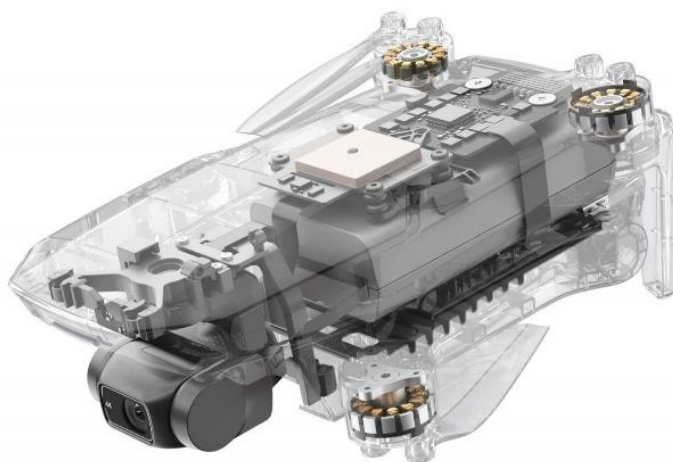
Vývoj bezpilotních prostředků se velmi rychle posouval, a to hlavně díky armádním investicím. Dnes můžeme bezpilotní letadla zahlédnout ve spoustě různých civilních a průmyslových odvětvích, a takový dron si dnes může pořídit úplně každý. Během posledních deseti let došlo mezi civilními UAV k ohromnému rozvoji. Stalo se tak především díky miniaturizaci, dostupnosti palubní elektroniky a vývoji moderních Lithium-Iontových a Lithium-Polymerových akumulátorů.



Obrázek 5 - Lithiový článek

Tyto akumulátory jsou vyvíjeny primárně pro smartphony, tablety, notebooky a jiná osobní elektronická zařízení. Dokáží poskytnout kapacitu a proudovou zatížitelnost, srovnatelnou s Ni-Mh a Ni-Cd akumulátory, při mnohem nižší hmotnosti, která je velmi úzce spjatá s žádanou dobou letu stroje. Pro vývoj civilních bezpilotních letounů je tak nezbytná efektivní a široká produkce komponentů palubního vybavení. Jedním z klíčových faktorů, který v posledních letech přispěl k dostupnosti těchto komponentů, je rychlý rozvoj spotřební elektroniky. Díky technologickým pokrokům v tomto odvětví

se komponenty, které byly dříve vysoko cenově nastaveny, staly běžně dostupnými s mnohem nižšími náklady. Tento trend vedl k významnému snížení cen palubní elektroniky.



Obrázek 6 - Elektronika kompaktního rozkládacího dronu

V současném civilním sektoru bezpilotních letounů dominují UAV (neosazené letecké prostředky) ovládané dálkově, obvykle prostřednictvím radiostanic. Některá z těchto zařízení jsou vybavena stabilizací, která je řízena pomocí tlakových senzorů výšky a přijímačů signálu GNSS (Globální navigační satelitní systém). Naproti tomu úplně autonomní drony jsou v současné době vzhledem k legislativním omezením převážně využívány ve vojenském sektoru.



Obrázek 7 - Vojenský dron MQ-9 Reaper

Pokud jde o konstrukční aspekty, drony s pevným křídlem jsou v civilním prostředí méně běžné. Jsou sice efektivnější, ale méně skladné, hůře ovladatelné a většinou vyžadují startovací dráhu. Hranice mezi těmito drony a modely letadel může být někdy nejasná.

Většina civilních dronů je navržena tak, aby generovala vztlak primárně prostřednictvím motorů, namísto křidel nebo rotorů. Tuto kategorii označujeme obecně jako "koptéry". Motory u těchto zařízení nejenže poskytují vztlak, ale také pomáhají stabilizovat let. S pokročilou řídicí elektronikou, vybavenou miniaturními gyroskopickými senzory, lze modulovat tah jednotlivých motorů, což umožňuje měnit směr letu a provádět často složité vzdušné manévry.



Obrázek 8 - Spotřebitelský dron DJI Phantom 4

Drony lze kategorizovat na základě širokého spektra kritérií, jako cenového rozpětí, rozměrů, vybavenosti, zaměření použití, množství rotorů, autonomie letu, leteckých schopností či neseného vybavení. V následující sekci budou prezentovány tři klíčové kategorie dělení, které hrají rozhodující roli při výběru dronů pro uplatnění ve stavebním sektoru. Prvním kritériem je klasifikace podle zamýšleného využití, což často koreluje s cenovou kategorií daného zařízení. Dále pak podle konstrukčního řešení, a nakonec dle technologie a využití, kterou daný stroj nese ve vzduchu.



Obrázek 9 - Různá konstrukční řešení koptér

Rozdělení dle využití dronu

Hračky a drony pod 250g bez kamery

Dron, který je vyroben pro použití dětí do 14let a je klasifikován jako hračka, podle směrnice 2009/48/ES Evropského parlamentu o bezpečnosti hraček nebo dron, u kterého je potvrzeno prostřednictvím prohlášení o shodě s normami Evropské Unie, že nenesení kamery a má vzletovou hmotnost menší než 250 gramů, nemusí být registrován a jeho provoz je možné uskutečnit bez registrace pilota a pilotního průkazu. Jedná se hlavně o levné stroje za několik stovek korun, které nemají vysokou kvalitu. Tyto stroje bývají také často těžko ovladatelné pro začátečníky, a to hlavně kvůli absenci senzorů a GNSS modulu. Drony jsou navrženy většinou pro let v interiéru a na krátkou vzdálenost, na dohled očí, protože se jinak ovládat nedají. Nejedná se tedy v žádném případě o vhodnou volbu pro vstup do světa dronů, protože začátečníka tyto stroje spíše odradí a zbytečně ho připraví o peníze.



Obrázek 10 - Dron hračka

Spotřebitelské drony

Jakmile dron nese kameru nebo jiné zařízení, které je schopné zaznamenávat osobní údaje, je nutné dron registrovat a zajistit si pilotní průkaz. Ten lze získat zdarma absolvováním online testu na stránkách Úřadu pro civilní letectví. Díky pilotnímu průkazu podkategorie OPEN je možné pilotovat koptéry do hmotnosti až 25 kg, při splnění dalších kritérií. Tyto drony lze pořídit již od 8000 Kč.

Většinou již disponují kamerou pro přenos obrazu na větší vzdálenosti a možností nahrávání použitelného video-záznamu, GNSS modulem a senzory pro hlídání výšky a polohy v prostoru, pro nouzový návrat v případě ztráty ovládní. Tyto drony už lze

považovat za ideální volbu pro vstup do světa dronů, a to pro všechny bez nutnosti zkušeností nebo praxe dron ovládat.



Obrázek 11 - Spotřebitelský dron DJI Mini 2

Poloprofesionální drony

Za poloprofesionální drony se mohou považovat drony s kamerou, které nabízí vysoce kvalitní kamerové senzory, schopné zachytit ostré a detailní fotografie a videa ve vysokém rozlišení. Toto rozlišení nejenže splňuje, ale často překračuje standardy potřebné pro komerční využití, což je činí ideálními pro různé marketingové kampaně, reklamy či prezentace produktů.



Obrázek 12 - Ukázka fotografie z dronu DJI Mini 2

Tyto drony mají stejné funkce jako drony v předešlé kategorii, pouze jsou ve všech aspektech lepší, například disponují mimo GNSS a senzorů výšky také antikolizními senzory, výkonnou výpočetní jednotkou umožňující autonomní let dronu a vyhýbání se překážkám nebo několik přepínatelných kamer pro různé účely. Některé drony například umožňují přepínat mezi objektivy na blízko a na dálku s optickým zoomem.



Obrázek 13 - Vybavený spotřebitelský dron DJI Mini 3 Pro

Technologie a design dronů prošly v posledních deseti letech značným vývojem. Nejenže jsou vyrobeny z kvalitnějších a odolnějších materiálů, ale jejich konstrukce je navržena tak, aby odolávala nástrahám, které může přinášet let v exteriéru. To znamená, že jsou mnohem sofistikovanější než starší modely. Robustní konstrukce a pokročilé stabilizační systémy jim umožňují zůstat stabilní i při letu v méně příznivých povětrnostních podmínkách, jako je vítr či mírný déšť.



Obrázek 14 - DJI Mini 3 Pro odolávající extrémnímu větru

Tato kombinace vysoké kvality snímků a videí spolu s vylepšenou stabilitou a odolností činí moderní drony vysoce atraktivními pro profesionály v oboru vizuálního obsahu. Ovšem oslovuje také nadšence a hobby fotografy, kteří chtějí svou vášeň posunout na vyšší úroveň. Tyto drony lze pořídit už od 20 000 Kč a za nejvýznamnější výrobce můžeme označit DJI, Autel a Skydio.



Obrázek 15 - Drony firmy Autel, DJI, Skydio

FPV a závodní drony

FPV drony jsou taková kategorie mezi profesionálními a poloprofesionálními drony. FPV drony jsou převážně sestaveny samotným pilotem z jednotlivých komponentů, ale dají se také koupit již sestavené. Avšak sestavení a nastavení samotného dronu vyžaduje velké množství samostudia a mechanické zručnosti. I kdyby si začátečník pořídil sestavený a připravený dron k letu, nejspíše by ani nevzlétl, případně by s dronem okamžitě havaroval. Hlavním aspektem FPV létání neboli First person view létání je, jak z názvu vypovídá, létání z pohledu první osoby. FPV drony disponují kamerou a video-vysílačem, který vysílá obraz z kamery na dronu do FPV brýlí nebo obrazovky k pilotovi. Využití FPV dronů je převážně v kinematografii a závodění (drone racing), ale díky možnosti si dron uzpůsobit dle vlastních potřeb, jsou možnosti využití prakticky neomezené.



Obrázek 16 - Piloti Drone Racing League

U FPV dronů bývá zvykem, že kamera není umístěna na gimbalu, ale je upevněna pod určitým úhlem v těle dronu, tedy pilot létá převážně směrem vpřed. Oproti konzumním dronům let s FPV dronem vyžaduje určité zkušenosti. FPV dron nedisponuje žádnými asistenty, senzory nebo možností autonomního letu, pokud si je pilot sám nenaprogramuje. Let s FPV dronem je tedy plně manuální a je potřeba při něm být maximálně soustředěný, obzvláště při vyšších rychlostech. Většina hobby pilotů své drony používají k rekreačnímu létání, ať už cinematic pomalejšímu létání přírodou nebo freestyle létáním mezi překážkami v kombinaci s akrobatickými manévry.



Obrázek 17 - Běžné vybavení FPV pilota

Požizovací cena samotného dronu není velká, dá se pořídit od 6000 Kč, avšak to je cena za pouhý dron. Ke dronu je zapotřebí vysílačka, FPV brýle, alespoň jedna baterie a nabíječka baterií. Toto potřebné vybavení stojí od 10 000 Kč po 40 000 Kč v závislosti na zvoleném systému přenosu obrazu nebo použitém RC systému.

Komerční drony

Stroje určené pro komerční využití se liší od těch konzumních svým designem, kapacitou a specifikačními potřebami. Zatímco konzumní drony mohou být ideální pro hobby fotografy a amatérské piloty, komerční drony jsou navrženy s ohledem na náročné profesionální aplikace.

Jsou to převážně drony určené k nesení speciálních zařízení, jako jsou termokamery, jsou často využívány ve službách týkajících se bezpečnosti a monitoringu. S termokamerami lze snadno detekovat teplotní anomálie, což je užitečné například při hledání osob v noci nebo v náročných povětrnostních podmínkách.

Multispektrální kamery pak nalézají své využití zejména v zemědělství. Pomáhají farmářům analyzovat zdraví plodin tím, že odhalují informace, které lidské oko nemůže vidět. To může vést k optimalizaci postřiků a hnojení, což vede k vyšším výnosům.



Obrázek 18 - Profesionální koptéra

V oblasti průmyslu mohou být drony vybaveny senzory a skenery, které sledují kvalitu konstrukcí, detekují praskliny na mostech nebo sledují stav energetických vedení. Takové inspekční operace nejenže šetří čas, ale také zvyšují bezpečnost tím, že omezují potřebu lidského zásahu v potenciálně nebezpečných oblastech.

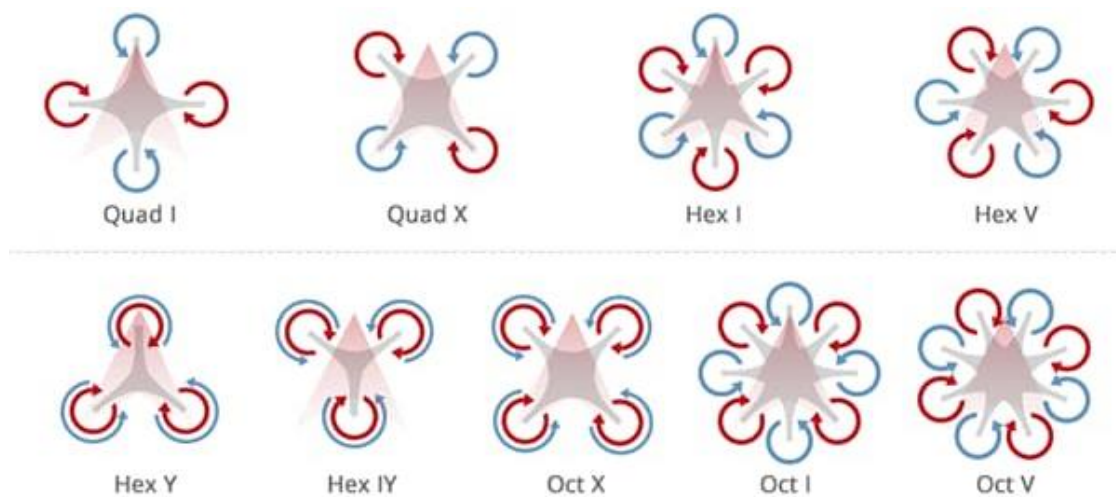
Drony s možností nést velké filmové kamery jsou hojně využívány ve filmovém průmyslu. Umožňují tvůrcům získat záběry, které byly dříve nemožné nebo velmi nákladné, od dechberoucích panoramatických záběrů po komplikované letecké shoty.

Ačkoli mají tyto drony vyšší náklady na pořízení, jejich schopnost provádět specializované úkoly a zvyšovat efektivitu v mnoha oblastech znamená, že jejich návratnost investic může být velmi rychlá. Pro mnoho profesionálů v různých odvětvích se drony staly neocenitelným a nepostradatelným nástrojem. Tyto drony se dají pořídit od 100 000 Kč, avšak většina těchto je z velké části upravena pro konkrétní použití a cena samotného dronu je jen zlomek ceny neseného zařízení.

Rozdělení dle konstrukce dronu

I když si většina lidí pod pojmem dron představí čtyřmotorový stroj se základnou ve tvaru X, ve skutečnosti existuje celá řada variací konstrukčních řešení. Obecně platí, že čím je menší počet motorů, tím může být konstrukce při použití větších vrtulí v rámci doby letu efektivnější, ale daleko méně stabilnější a spolehlivější, než stroje s šesti a více motory.

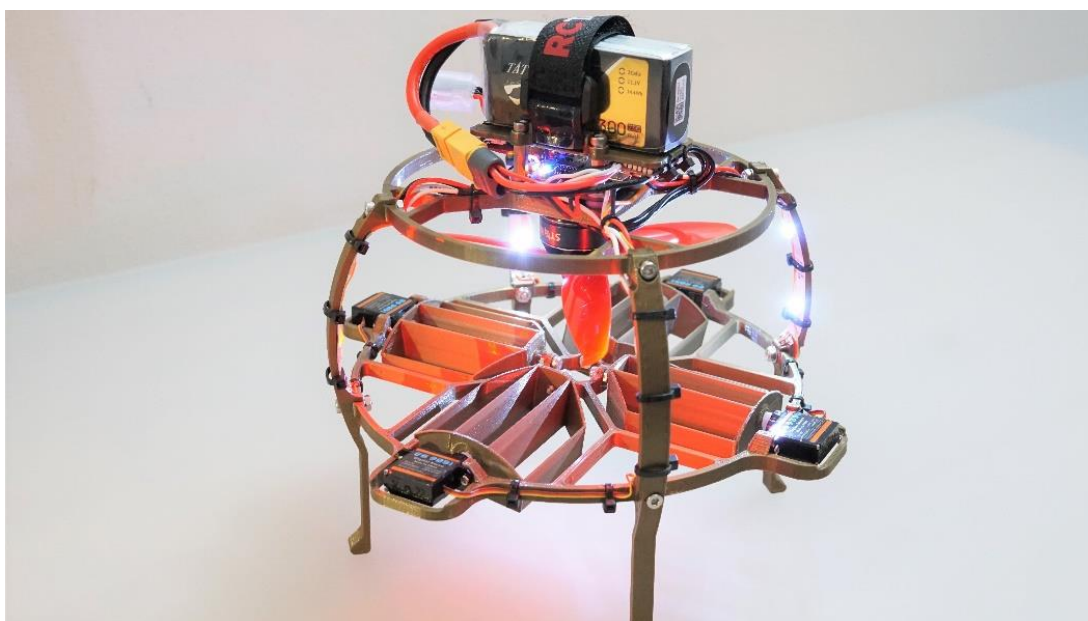
Koptéry mohou být klasifikovány podle počtu motorů nebo pohonných jednotek. Mezi nejznámější patří quadkoptéry (se čtyřmi motory), ale na trhu najdeme také hexakoptéry (se šesti motory), oktokoptéry (s osmi motory) a další varianty s různým počtem motorů.



Obrázek 19 - Různý počet a uspořádání motorů koptéry

Jednomotorové drony bez křídel

Stroje s jedním motorem nejsou u bezpilotních letadel rozšířené, a to hlavně kvůli horší stabilitě, složitějšímu ovládní a vyšší pořizovací ceně, z důvodu komplikovaného ústrojí rotoru a sérii lopatek pro usměrnění proudu vzduchu.



Obrázek 20 - Jednomotorová koptéra

Vícemotorové drony

Kategorie vícemotorových dronů je nejvíce rozšířená a patří do ní všechny drony s dvěma a více motory. Bi-koptéry a tri-koptéry stále vyžadují mít některé ze svých rotorů naklopitelné, je zde tedy stále velká nevýhoda v komplikovaném řešení konstrukce a větší náchylnosti na poruchu, horší stabilitě letu a složitosti ovládání. Mezitím nejrozšířenější quadro-koptéra nevyžaduje mít naklopitelný žádný ze svých rotorů a její konstrukce je zdaleka nejjednodušší. Přestože každý motor navíc způsobuje větší spotřebu energie, není to tak drastický rozdíl oproti tri-koptéře. Stroje se šesti a více rotory, například hexakoptéra, nabízí zvýšenou spolehlivost ve srovnání s běžnými čtyřvrtulovými drony. Je to hlavně kvůli možnosti dronu pokračovat v letu i v případě selhání jednoho nebo více rotorů, což může být klíčové v kritických situacích, kdy je potřeba zabezpečit bezpečný návrat dronu na zem. Co se týče řízení, drony nevyužívají tradiční aerodynamické prvky, jakými jsou kormidla nebo směrové klapky. Namísto toho je směr a výška letu určována regulací otáček jednotlivých vrtulí. Pro změnu směru se mění otáčky na zvolených vrtulích v závislosti na požadovaném směru. Například pro pohyb dopředu se zvýší otáčky zadních motorů, což způsobí náklon dronu dopředu a jeho pohyb tímto směrem. Tento princip umožňuje dronům velmi přesné manévrování v prostoru, což je činí ideálními pro různé aplikace vyžadující precizní práce.



Obrázek 21 - Průmyslová oktokoptéra

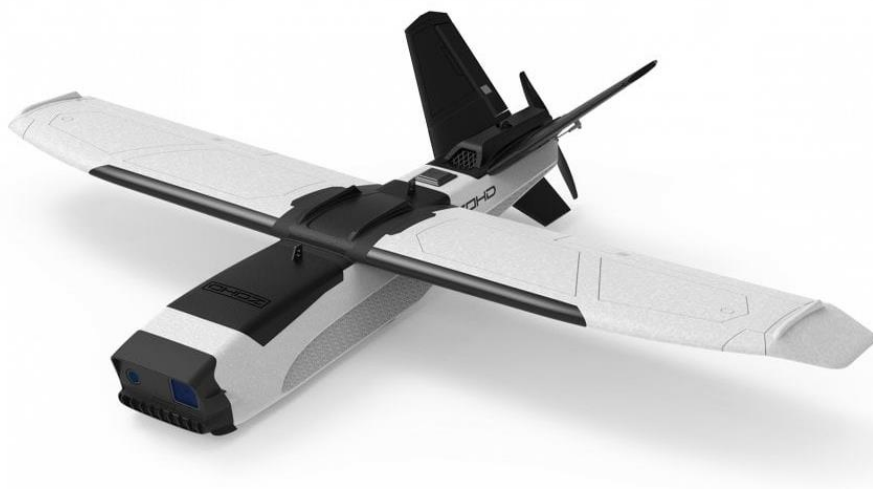
Drony s pevnými křídly

Drony s křídly se více podobají letounům než koptérám, kdy mimo vrtule disponují také křídly a k letu využívají vztlak vzduchu pro efektivnější let jedním směrem. Z tohoto důvodu jsou ideální pro delší lety, popř. mapování velkého území nebo doručování zásilek. Při kombinaci s pohonem na benzínový, popř. solární pohon, jsou schopny letů

trvajících i několik hodin. Bezspornu největší nevýhodou letounů a jiných typů strojů s pevnými křídly je, že se nemohou vznášet na jednom místě. To omezuje jejich schopnost vykonávat některé úkoly, které jsou běžné pro vrtulníky a koptéry, jako je detailní inspekce struktur z blízka, vzlet a přistání na malých nebo nesymetrických plochách a schopnost přesného manévrování v omezených prostorech.

Další nevýhodou strojů s pevnými křídly je jejich složitější ovladatelnost, zejména ve srovnání s vrtulníky a koptéry. Stroje s pevnými křídly vyžadují vyšší dovednosti a zkušenosti pilota, a to zejména při vzletu, přistání a v náročných leteckých manévrech.

Pro vzlet a přistání letadel s pevnými křídly je také nutný výrazně větší, resp. delší prostor než u vrtulníků a koptér. Zatímco vrtulníky a koptéry mohou vzlétnout a přistát téměř kdekoliv, letadla s pevnými křídly obvykle potřebují dlouhou a rovnou vzletovou dráhu, nebo vystřelovací zařízení, která je dostane do letové rychlosti. Toto omezení může být významným faktorem při plánování misí a výběru vhodného typu letounu pro konkrétní úkol. Vysoká cena je dalším faktorem, který omezuje využití strojů s pevnými křídly. Vzhledem k jejich složitější konstrukci, vyšším nárokům na údržbu a vyššími náklady na provoz mohou být stroje s pevnými křídly dražší než koptéry.



Obrázek 22 - Letadlo s pevnými křídly ZOHD Talon

Hybridní drony

Výrobci dronů se neustále snaží inovovat a vylepšovat své produkty, aby vyhověly rostoucím požadavkům trhu a zároveň zefektivnily jejich provoz. V tomto kontextu vznikají hybridní drony, které kombinují výhody tradičních dronů a dronů s pevnými křídly. Takzvané VTOL drony (Vertical Take-Off and Landing) dokáží využívat vztlak vzduchu pro efektivní přímý pohyb ve vzduchu, což výrazně šetří energii ve srovnání s

drony, které se musí neustále vznášet pomocí svých rotorů. To umožňuje těmto hybridním dronům cestovat na delší vzdálenosti a vydržet déle ve vzduchu.

Navíc jsou VTOL drony schopné kolmého startu a přistání, což jim umožňuje operovat v omezených prostorech, kde není dostatek místa pro běžný vzlet a přistání, jaké vyžadují stroje s pevnými křídly. Tato schopnost také znamená, že mohou operovat v těžko přístupných oblastech, což otevírá nové možnosti pro jejich využití, například v oblasti humanitární pomoci, zemědělství nebo monitorování životního prostředí.

Přestože jsou hybridní drony obecně dražší než jejich běžné protějšky, jejich univerzálnost a schopnost vykonávat širokou škálu úkolů je činí atraktivní pro mnoho společností a organizací. Dopravní společnosti jako DHL nebo Zipline již využívají tyto inovativní stroje k doručování zásilek a léků v odlehlých a těžko dostupných oblastech.



Obrázek 23 - VTOL

Využití dronů ve stavebnictví

Tato podkapitola popisuje dílčí činnosti prováděné pomocí dronů ve stavebnictví a uvádí stroje, které jsou pro tyto činnosti specifické a v praxi se využívají.

Letecké fotografie a video

Nejzákladnější a také nejčastější úkon prováděný pomocí dronů je právě fotografování a natáčení videa pomocí RGB kamery na dronu. Tyto kamery mohou být integrovány do konstrukce dronu nebo mohou být jako přídavné zařízení. U integrovaných kamer kvalita kamery odpovídá poměrně částce dronu s nemožností kameru vyměnit. Většinou se jedná o kamery menších rozměrů, které disponují i menším senzorem a kvalita pořízených záznamů je spíše poloprofesionální. Dnešním standardem se stává video o rozlišení 4K s 10bit barvami a fotografie o rozlišení až 48Mpx s možností focení do RAWu. Tato digitální data mohou být rovněž využita pro virtuální nebo rozšířenou realitu, což nabízí zcela novou úroveň prezentace a interakce s projektem. Investoři nebo budoucí uživatelé mohou prostřednictvím VR headsetů procházet budovou nebo jejím

okolím např. z ptačí perspektivy ještě před jejím skutečným dostavením. Takto mohou být lépe pochopeny funkční aspekty navrhované konstrukce.

Použití letecké fotografie a počítačového modelování znamená významný posun od tradičních metod ke komplexní digitální integraci, což zvyšuje efektivitu, snižuje náklady a zkracuje čas potřebný pro realizaci výstavbových projektů, zatímco současně umožňuje vyšší míru detailu a přesnosti ve všech fázích projektu.

Ideálními adepty pro tuto práci se nabízí DJI Mavic 3, DJI Air 3 nebo DJI Mini 4 Pro.

DJI Mavic 3

Mavic 3, jakožto vlajková loď komerčně prodávaných dronů firmy DJI, nabízí při váze 900g kvalitní snímky z 4/3 CMOS Hasselblad kamery v rozlišení 20Mpx spolu s 5,1K videem o snímkové frekvenci až 50Hz.

Mavic 3 se prodává v několika variantách, například ve variantě Pro se dvěma přídatnými teleobjektivy nebo ve variantě Cine, kdy všechny kamery podporují kódování Apple ProRes 422 HQ, Apple ProRes 422 a Apple ProRes 422 LT, které ocení profesionální filmaři. [4]

Mavic 3 zvládne ve vzduchu viset až 43minut s dosahem až 10 km při živém přenosu FullHD videa, disponuje 360° antikolizním systémem a funkcí vyhýbání se překážkám pomocí osmi optických senzorů. Samozřejmě mu nechybí ani chytré funkce jako Focus Track, kdy dron drží v záběru vybraný objekt, nebo Active Track, kdy dron autonomně dokáže sledovat vybraný objekt a během letu se vyhýbat překážkám.

Tento dron je určitě skvělou volbou pro profesionální fotografy nebo filmaře, avšak je potřeba počítat s vyšší pořizovací cenou začínající na 54 000 Kč (v době psaní této práce) a kvůli hmotnosti nad 250 gramů s omezením míst pro létání bez předběžného povolení od Úřadu pro civilní letectví.



Obrázek 24 - DJI Mavic 3

DJI Air 3

Dalším adeptem je DJI Air 3, který díky své váze 720 gramů stále patří k těžším dronům, v kategorii nad 250 gramů. Nabízí dvě kamery, jednu širokoúhlou kameru s 1/1,3" CMOS senzorem a jednu středně velkou kameru s 1/1,3" CMOS senzorem a 3násobným přiblížením. Obě kamery mají stejnou velikost snímače, ale rozdílnou ohniskovou vzdálenost, což přináší konzistentní kvalitu obrazu a větší možnosti dynamického zobrazování, oboje s možností natáčet video o rozlišení 4K při 100Hz. [5]

Air 3 zvládne ve vzduchu viset až 46minut a stejně jako Mavic 3 disponuje 360° antikolizním systémem a funkcemi jako Focus Track, Active Track apod.

Tento dron je ideální volbou pro poloprofesionální fotografování nebo natáčení videí pro menší firmy a studia. Pořizovací cena tohoto dronu začíná na 28 000 Kč (v době psaní této práce). Stejně jako v případě Mavic 3 je potřeba z důvodu hmotnosti přesahující 250 gramů počítat s omezením míst pro létání bez předběžného povolení od Úřadu pro civilní letectví.



Obrázek 25 - DJI Air 3

DJI Mini 4 Pro

Posledním adeptem je DJI Mini 4 Pro, který váží pouhých 249 gramů, ale přesto disponuje spoustou funkcí, které nabízí i mnohem dražší modely. Mini 4 Pro je osazen pouze jednou kamerou s 1/1,3palcovým snímačem CMOS s funkcí Dual Native ISO Fusion, clonou f/1,7 a 2,4μm pixely 4 v 1. Díky HDR videu ve 4K rozlišení a zpomalenému videu při až 100Hz, lze zachytit velmi detailní záběry, zatímco se video ve formátu 10-bit D-Log M postará o ohromující škálu 1,07 bilionu barev. [6]

Mini 4 Pro zvládne ve vzduchu viset až 34minut a disponuje 360° antikolizním systémem a funkcemi jako Focus Track, Active Track apod.

Mini 4 Pro je vhodný pro ty nejmenší firmy a studia, případně začínající hobby piloty. Cena začíná na 20 000 Kč (v době psaní této práce) a díky hmotnosti pod 250g je nejvhodnější do všech situací.

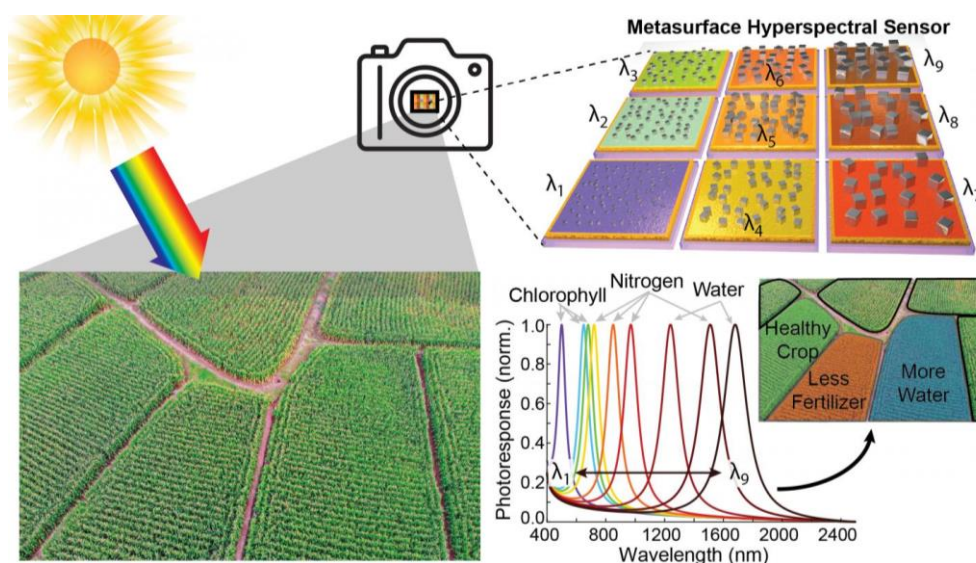


Obrázek 26 - DJI Mini 4 Pro

Inspekce multispektrální kamerou

Inspekce multispektrální kamerou je sběr dat pro vyhodnocení kvality půdy a zemědělských plodin, stavu vegetace a jeho změn v čase. Je k tomu využívána čtyřkanálová kamera se čtyřmi samostatnými senzory pro snímání světla ve čtyřech pásmech vlnových délek:

- zelené světlo (510–550 nm)
- červené světlo (620–760 nm)
- red edge (690–730 nm)
- blízká infračervená oblast (NIR; 760–1 400 nm)



Obrázek 27 - Princip inspekce multispektrální kamerou

Princip snímání je založen na odrazivosti a měří množství elektromagnetického záření vyzařovaného nebo odraženého zemským povrchem. Zdrojem záření je každý objekt, který má větší teplotu než 0 K (-273.15 °C). Takový objekt na zemském povrchu má určité fyzikální vlastnosti, které ovlivňují odražené elektromagnetické záření, jehož primárním zdrojem je slunce. V zemědělství například na základě odrazivosti světla od listů rostlin. [7]

Díky tomu lze určit množství chlorofylu, které obsahují. Na základě této hodnoty je možné posoudit jak zdraví rostlin, tak sekundární ukazatele, například kvalitu nebo aktuální vlhkost půdy. Vytváříme tak podklady pro precizní zemědělství. Snímkování slouží také ke sledování vegetačních příznaků v archeologickém průzkumu. [8]

DJI Mavic 3M

Přestože se jedná o profesionální dron, zůstávají jeho rozměry kompaktní, což usnadňuje přenášení a použití v terénu. Dron váží 950 gramů a ve vzduchu je schopen viset až 43 minut. K dispozici má 2 kamery – multispektrální a RGB. DJI Mavic 3M proto zvládne polohování RTK na úrovni centimetrů. Pro co největší efektivitu je dron schopný zaměřit až 200 hektarů plochy v rámci jednoho letu.

DJI Mavic 3M je vybaven multispektrální kamerou a RGB kamerou. Princip snímání je založen na odrazivosti, měří množství elektromagnetického záření vyzařovaného nebo odraženého zemským povrchem. Zdrojem záření je každý objekt, který má větší teplotu než 0 K. Takový objekt na zemském povrchu má určité fyzikální vlastnosti, které ovlivňují odražené elektromagnetické záření, jehož primárním zdrojem je slunce. [9]

Každá ze čtveřice multispektrálních kamer disponuje rozlišením 5 MP, RGB kamera je vybavena 20 MP čočkou. Dron tak zvládá vysoce přesné letecké měření, sledování růstu plodin či průzkumy nejrůznějších přírodních zdrojů. Aby bylo měření co nejpřesnější, je DJI Mavic 3M vybaven senzorem slunečního záření. To je monitorováno po celou dobu letu. Následně jsou získaná data využita pro světelnou kompenzaci obrazových dat. Tím se zvyšuje konzistentnost pořízených snímků. [9]

Speciální aplikace na základě pořízených multispektrálních snímků plodin zvládne generovat NDVI (Normalized difference vegetation index) mapy, stejně jako dokáže zachytit rozdíly potenciálu plodin a zpracovat další vegetační indexy. To vše pak větším zemědělským dronům umožní provádět aplikace postřiku, hnojiv a dalších podpůrných

látek s proměnlivou rychlostí. Zemědělci tak mohou ušetřit náklady, zvýšit výnosnost plodin a zároveň chránit životní prostředí. [9]

Cena dronu začíná na 110 000 Kč (v době psaní této práce), přičemž je určen pro profesionální použití převážně v zemědělství. [9]



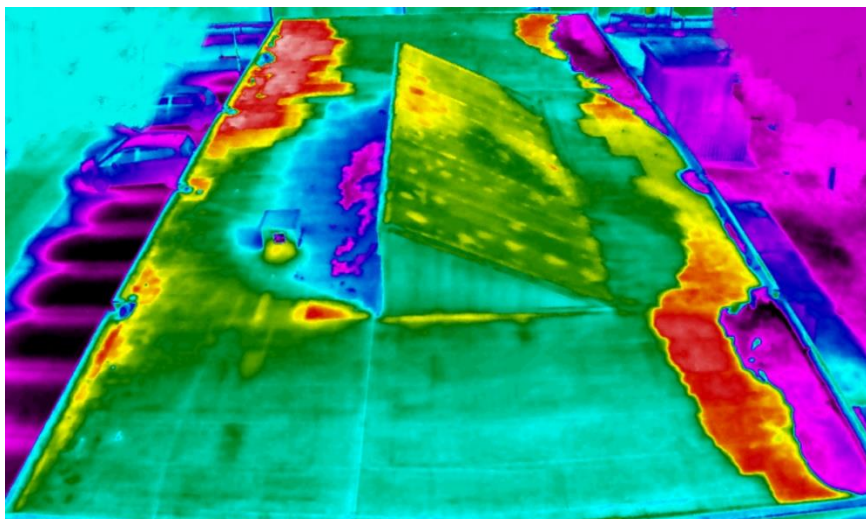
Obrázek 28 - DJI Mavic 3M

Inspekce termokamerou

Po běžných RGB kamerách jsou termokamery druhou nejčastěji používanou technologií. Využití termálního snímání je zásadní pro kontrolu staveb, bytů i průmyslových zařízení. Termokamery dokáží jednoduše zaznamenat místa s tepelnými mosty nebo pronikáním vody, která se na termálním snímku vyznačují odlišnými teplotními vlastnostmi oproti okolnímu prostředí. Tyto teplotní rozdíly jsou indikátory potenciálních problémů. V kombinaci s praktickými zkušenostmi ze stavebnictví je možné efektivně diagnostikovat příčiny problémů a přijít s vhodnými řešeními.

Termovizní kamery jsou primárně používány k detekci teplotních úniků v budovách, odhalují slabá místa v tepelné izolaci a tepelné mosty vzniklé špatnou aplikací nebo návrhem izolace, stejně jako další skryté defekty ve struktuře, které běžná kontrola neodhalí.

Jinou rostoucí oblastí využití termokamer je identifikace míst, kde dochází k pronikání vody do budovy. Vlhký materiál se na termálním snímku jeví odlišně od suchého prostředí, což umožňuje rychlou lokalizaci problému. Suchá izolace se zahřívá a ochlazuje jinak, než mokrá, což využíváme při termografické inspekci – v létě po ránu nebo večer, kdy se vlhká místa projeví jako chladnější nebo teplejší. V zimě je díky tepelné vodivosti vlhké izolace možné identifikovat místa s úniky tepla z interiéru.



Obrázek 29 - Ukázka snímku z termokamery

Je však třeba poznamenat, že termografie není univerzálním řešením. Někdy může být její využití omezeno klimatickými podmínkami – nedostatečné sluneční světlo nebo vlhkost po dešti mohou zkreslit výsledky. Specifické střešní pokrytí, jako jsou odrazivé materiály nebo zelené střechy, také mohou termografické snímání znemožnit, protože vrchní vrstva brání v získání termografických dat.

DJI Mavic 3T

Profesionální dron na bázi Mavic 3 – DJI Mavic 3T má hmotnost 920 gramů, na jedno nabití ve vzduchu vydrží 45 minut a zvládne naskenovat až 2 km².

Dron je osazen termální kamerou se senzorem s 61° DFOV a kvalitou obrazu 640×512 při 30Hz. Změří teplotu v konkrétním bodě nebo teplotu označené oblasti a nabízí zobrazení pomocí barevných palet a isotherm včetně nastavení teplotních upozornění. S dronem je možné provádět fotografické snímání buď izolovaně nebo v sériích s periodicitou 0,7 sekundy. Implementace doplňkového RTK modulu umožňuje využití extrémně přesné geolokalizace na úrovni centimetrů bez nutnosti externích referenčních bodů. Optický systém s rozlišením 12 megapixelů, známý z modelu Mavic 3, poskytuje uživatelům funkci až 56krát hybridně zvětšujícího zoomu, což je neocenitelné pro efektivní provedení inspekčních letů. Detekční senzory pro navigaci a vyhýbání se překážkám jsou navrženy k aktivnímu snímání prostředí v komplexním 360° rozsahu kolem dronu.

Cena dronu začíná na 135 000 Kč (v době psaní této práce) a je určen pro profesionální použití. [10]



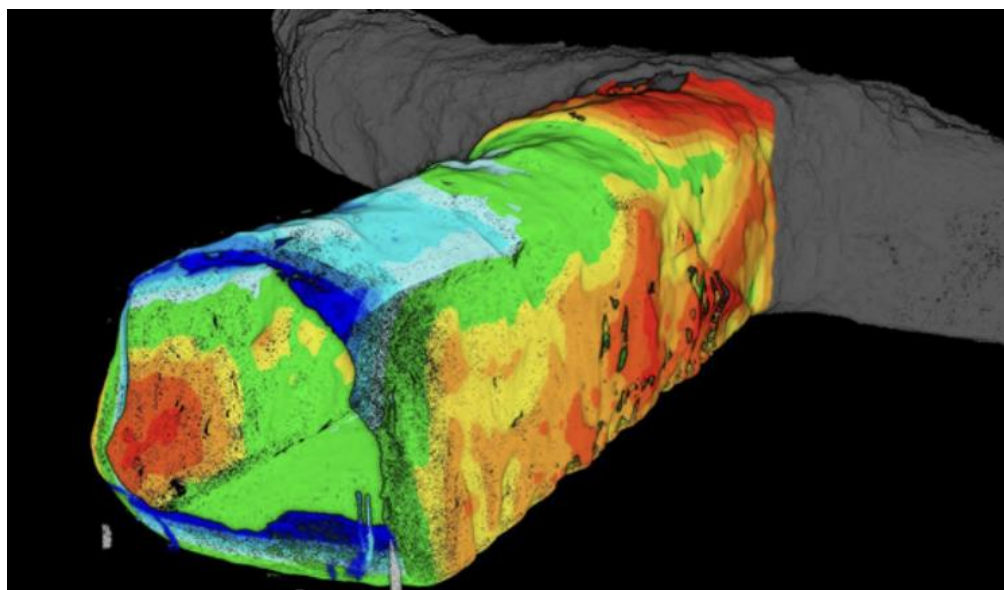
Obrázek 30 - Mavic 3T

Mapování LiDARem a fotogrammetrií

LiDAR a fotogrammetrie jsou dlouhodobě považovány za klíčovou technologii pro odborníky v geodézii a kartografii. Avšak s pokrokem v oblasti dronových technologií došlo k výraznému zlepšení ve sběru dat. Drony poskytují výhody oproti tradičnímu leteckému průzkumu, který byl závislý převážně na posádkových letadlech, a přinášejí bezpečnější, přesnější a ekonomicky výhodnější způsob sběru dat. S tím, jak se technologie stává více přístupná, mohou nyní různé obory, jako zemědělství, stavebnictví, ochrana přírody, těžební průmysl, ale i forenzní rekonstrukce nehod, využívat detailní mračna bodů, precizní mapování a trojrozměrné modelace k efektivnějšímu a produktivnějšímu provozu.

LiDAR je zkratka pro „Light Detection and Ranging“, což je metoda dálkového měření vzdálenosti na základě výpočtu doby šíření pulsu laserového paprsku odraženého od snímaného objektu. Senzory LiDAR fungují tak, že vysílají světelné impulsy a měří čas potřebný k jejich zpětnému odrazu od země, spolu s intenzitou. Ačkoli se LiDAR používá již po celá desetiletí, teprve v posledních letech se technologie LiDAR stala dostatečně kompaktní na to, aby jej bylo možné integrovat do užitečné zátěže, kterou může nést dron. Senzor LiDAR představuje pouze jednu část komplikovaného procesu. Pro sběr dat potřebných k vytvoření mračna bodů, které přesně odráží terén a jeho topografii, obsahuje LiDAR další vysoce přesné systémy jako satelitní určování polohy a inerciální měřící jednotku (IMU). [11]

Největší komplikace při práci s LiDARem je pořizovací cena a rozměry samotného zařízení. I přes to, že se díky moderním technologiím podařilo technologii LiDARu zmenšit, je stále několikrát větší a těžší než RGB kamery. Je tedy potřeba pořídit větší a výkonnější dron, který toto zařízení ponese. I přes to, že LiDAR je aktuálně nejlepší a nejpresnější nástroj pro sběr prostorových dat, ve většině situacích postačí fotogrammetrie, která díky novějším softwarům pro zpracování snímků, které využívají strojové učení, dokáže nabídnout velmi konkurenceschopnou kvalitu dat.



Obrázek 31 - Ukázka 3D mapy zachycené LiDARem

Fotogrammetrie využívá pokročilou analýzu sady fotografií objektu pro zpětnou rekonstrukci polohy fotografických objektivů a následně k vytvoření 3D modelu scény jako mesh sítě s texturami. Speciální software je zde klíčovým nástrojem, který umožňuje převést sérii fotografií na detailní mapy a trojrozměrné modely. Mohou být zapotřebí stovky nebo i tisíce snímků, což závisí na rozsahu zkoumaného území a na požadovaném detailu a přesnosti modelu.

Při používání dronů pro fotogrammetrické účely je zásadní, aby piloti nastavili správnou výšku letu, která zajišťuje adekvátní rozlišení snímků pro danou aplikaci. Je také důležité přesně nastavit míru překrytí mezi snímky, aby software dokázal snadno a přesně skládat jednotlivé fotografie do celistvého obrazu.

Jedním z hlavních přínosů fotogrammetrie je její snadná dostupnost a aplikovatelnost. Díky pokroku v technologii dronů a rozvoji softwarů pro mapování se stala fotogrammetrie dostupnou technikou, která umožňuje vytvářet detailní mapy a 3D modely i pro ty, kteří disponují pouze základním dronem vybaveným kamerou.



Obrázek 32 - Ukázka 3D modelu vytvořené fotogrammetrií

Moderní software umožňuje propojení 3D modelu s realitou. Digitalizace a modelování dat budovy (Building Information Modeling, BIM) jsou dalšími aspekty, kde se letecká fotografie a počítačové modelování prolínají. BIM technologie umožňují vytvoření digitálního dvojčete stavby, které slouží nejen k vizualizaci, ale i k monitorování stavu během celého životního cyklu objektu. Letecké snímky mohou být do BIM modelů integrovány a poskytovat aktuální informace o postupu výstavby, které mohou být zásadní pro správu projektu.

Skydio 2+

I když pro fotogrammetrii lze použít kterýkoliv výše zmíněný dron, je důležité zmínit dron Skydio, který disponuje nejpropracovanějším autonomním letem na trhu a lze tak sběr dat velice zjednodušit a hlavně zrychlit.

Skydio je vybaveno šesti vizuálními senzory o rozlišení 4K, které umožňují dronu dynamicky analyzovat okolní prostor a v reálném čase vyhodnocovat optimální letovou trasu. Pomocí přidružené aplikace může pilot označit objekt pro skenování a následně dron autonomně provede jeho komplexní fotografický průzkum ze všech úhlů. Shromážděná data, včetně geografických souřadnic, jsou poté exportována do fotogrammetrického softwaru pro další zpracování a vytvoření finálního modelu.



Obrázek 33 - Autonomní plán letu dronu Skydio

Dron nese kameru se 12.3Mpx CMOS senzorem o rozměru 1/2.3 palce, která zvládne natáčet 4K video při 60Hz. Dron váží 775g a zvládne létat až 27 minut. [12]



Obrázek 34 - Skydio 2+

DJI Matrice 300 RTK

DJI Matrice 300 RTK, jakožto přední průmyslový model v portfoliu komerčních dronů firmy DJI, nabízí robustní konstrukci a výkonnou platformu pro rozsáhlé využití v různých odvětvích. Při hmotnosti 3,6 kilogramu je tento dron schopen nést různé senzory a kamery, a díky použití RTK (Real-Time Kinematic) navigace dosahuje milimetrovou přesnost v geopozicování. [13]

DJI Matrice 300 RTK je nabízen ve více konfiguracích, aby vyhověl specifickým potřebám různých průmyslových segmentů, včetně geodézie, stavebnictví, energetiky a záchranných služeb. K dispozici jsou různé moduly, jako je H20T s tepelnou kamerou pro vyhledávací a záchranné operace nebo laserový skener L1 pro 3D mapování.

Co se týče letových schopností, Matrice 300 RTK může zůstat ve vzduchu až 55 minut, což umožňuje dlouhodobé lety bez nutnosti časté výměny baterií. Dron má také vynikající dosah až 15 km v otevřeném prostranství a je vybaven pokročilými bezpečnostními systémy, včetně systému pro vyhýbání se překážkám, což zvyšuje jeho spolehlivost i v náročných podmínkách. Integrovaný systém pro správu letů umožňuje komplexní plánování misí a real-time monitorování.

U profesionálního nasazení je DJI Matrice 300 RTK oceňován pro svou modularitu, výdrž a přesnost, což jej činí ideálním nástrojem pro precizní data sběr a analýzu. Nicméně, s cenou, která začíná na 280 000 Kč v závislosti na konfiguraci a příslušenství, je zřejmé, že jde o investici cílenou na velké firmy. Navíc vzhledem k hmotnosti dronu je vyžadováno dodržení přísných pravidel a regulací pro létání v určených oblastech, a to v souladu s legislativou dané země. [13]

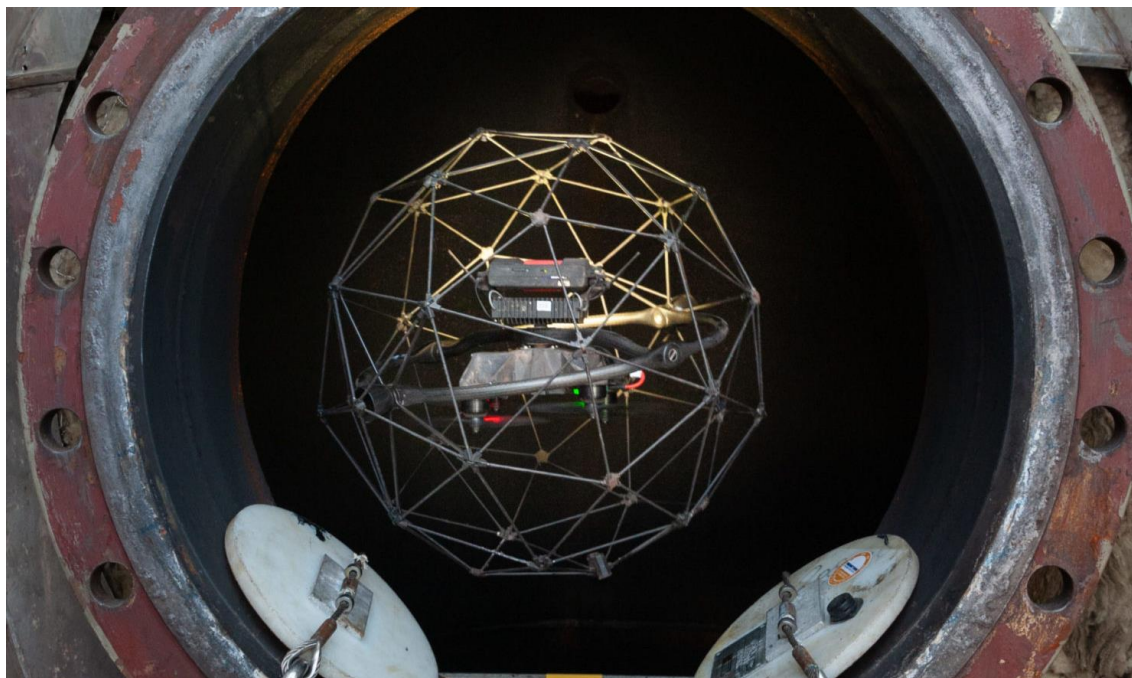


Obrázek 35 - DJI Matrice 300 RTK

Inspekce v prostorově stísněných podmínkách

Inspekční drony se stávají neocenitelným nástrojem v průmyslu a stavebnictví díky své schopnosti proniknout do obtížně dostupných míst a poskytnout podrobné vizuální informace bez nutnosti fyzického vstupu inspektorů do potenciálně nebezpečných nebo nedostupných prostor. Tyto drony se vyznačují menšími rozměry a antikolizním systémem, ať už senzory nebo ochranou klecí. Tyto aspekty jsou pro samotný dron velmi ztěžující z důvodu, že menší rozměry znamenají menší vrtule, a proto nižší výkon a nosnost, navíc ochranná klec přidává dronu hmotnost navíc. Proto mají tyto drony letový čas okolo deseti minut, oproti dronům pro vnější inspekce, které zvládají ve vzduchu viset i 30 až 40 minut.

Kromě kontrol nosných konstrukcí průmyslových hal, kde může dron snadno prolétat mezi trámy, sloupy a může prohlížet například vnitřní prostory nádrží a kotlů, které jsou často uzavřené a nebezpečné pro inspekce osobami, se dron uplatňuje i v dalších oblastech. Při inspekci kolektorů a potrubí dron eliminuje potřebu obtížného pohybu v uzavřených a často toxických prostředích, umožňuje rychlé lokalizování uniku a zjištění stavu izolace či koroze materiálu.



Obrázek 36 - Inspekce nádrže pomocí koptéry Elios 1

V oblasti mostního inženýrství umožňuje dron vyhodnotit stav pilířů, závěsů a dalších konstrukčních prvků mostů, které jsou často umístěné nad vodními toky nebo vysoko nad terénem. Může rychle identifikovat trhliny, korozi a jiné poškození, které by mohly naznačovat riziko selhání konstrukce. Přidanou hodnotou inspekčních dronů je možnost využití pokročilých senzorů, jako jsou termokamery pro detekci tepelných mostů, ultrazvukové sondy pro kontrolu tloušťky materiálů, nebo dokonce laserové skenery pro vytvoření 3D modelů. To umožňuje provádět mnohem komplexnější analýzy, než bylo dříve možné. Kromě zvýšení bezpečnosti a snížení rizika pro inspektory, drony také výrazně snižují náklady a čas potřebný k inspekcím, jelikož odpadá nutnost montáže lešení či omezení provozu při vstupu osob do nebezpečných oblastí.

Flyability Elios 3

Elios 3, který je nejnovějším přírůstkem do produktové řady společnosti Flyability, je navržen s důrazem na bezpečnost a přesnost ve stísněných průmyslových prostředích. S konstrukcí optimalizovanou pro inspekční účely a ochranou klecí, může tento dron bezpečně operovat v blízkosti lidí a citlivého zařízení, což ho činí ideálním pro interní inspekce.

Elios 3 je vybaven RGB kamerou s rozlišením, které jsou klíčové pro identifikaci a analýzu strukturálních problémů ve složitých průmyslových prostředích a termokamerou s rozlišením 160 x 120 při 9 fps. Dron může být vybaven detekčním systémem a senzory včetně LiDARu pro 3D mapování. Jeho rozměry umožňují přizpůsobení pro široký rozsah průmyslových aplikací, od energetiky přes těžební až po chemický průmysl.

Co se týče letové výdrže, Elios 3 může být ve vzduchu až 12 minut bez přídavného zařízení, což není mnoho. Je to však dáno rozměrem a hmotností dronu, který nedovoluje použití větších a tím i efektivnějších vrtulí. Je vybaven výkonným komunikačním systémem, který zajišťuje stabilní přenos dat i v komplikovaných a zarušených prostředích.

Vzhledem k jeho specializovanému využití, je Elios 3 vysoce oceňován pro jeho schopnost manévrovat v omezených prostorech a poskytovat podrobné informace o stavu infrastruktury. Jeho cena začíná na 50 000\$ tedy 1 100 000 Kč (v době psaní této práce), takže reflektuje unikátní vlastnosti, což naznačuje, že jeho pořízení je investicí směřující primárně k firmám se specifickými požadavky. [14]



Obrázek 37 - Inspekční koptéra Flyability Elios 3

3. Hypotéza

Na základě provedené rešerše se domnívám, že existuje možnost vytvořit originální alternativu systému pro inspekci ve stísněných prostorech k již existujícím komerčním řešením. Tato alternativa by měla být quadrokoptéra, schopna proniknout jakýmkoliv stísněným prostorem větším než 40 cm v průměru a provést inspekci prostor, kam je složitý přístup, nebo jsou prostory nebezpečné či zcela nepřístupné. Koptéra disponující antikolizním systémem v podobě ochranné klece, by měla být schopna pořídit kvalitní video záznam o rozlišení až 4K, který lze využít jak k vizuální inspekci, tak i k vytvoření 3D modelu části konstrukce nebo celého objektu. Koptéra by měla disponovat robustním bezdrátovým přenosem videa v rozlišení FHD, který zvládá procházet složitým prostředím skrze překážky a v otevřeném prostranství dosáhne až 12 km. Navíc by si koptéra měla zachovat nízkou hmotnost, dobrou ovladatelnost a dobu letu až 12 minut. Koptéra by měla být vybavena GNSS pozičním systémem pro navigaci v exteriéru, a LiDAR systémem pro navigaci v interiéru. Tím lze předpokládat, že bude výhodnější oproti komerčním řešením, a to jak pořizovacími náklady, tak hmotností, rozměry, dobou letu, hlučností i variabilitou, díky možnosti použití dílčích systémů od různých výrobců, nebo přidáním dalších systémů, jako například 3D skener nebo termální kamera.

4. Návrhové parametry dronu pro pohyb v prostorově stísněných podmínkách

Tato část diplomové práce se zabývá návrhem a konstrukcí inspekční koptéry. Jako vyráběný stroj byla zvolena quadro-koptéra se systémem INAV a FPV digitálním přenosem videa od firmy DJI. Firma DJI jakožto velikán na poli bezpilotních letadel a bezdrátové technologii přenosu obrazu se zdá být jako ideální volba pro výběr digitálního přenosu videa z koptéry k pilotovi. Koptéra je zamýšlena pro let ve stísněných a náročných podmínkách, proto je součástí jejího návrhu osvětlení v podobě 18W LED svítidla, které zaručí pilotovi dostatek světla k pilotáži i při úplné tmě. Zároveň je plánováno dodat koptěře LiDAR s Optical Flow senzorem pro možnost držení pozice a výšky v prostorech bez globálního navigačního systému. Proto byl vybrán systém INAV, který plně podporuje tyto externí senzory a disponuje pokročilými letovými režimy. Na koptéru je plánováno přidat GNSS modul s anténou a kompasem, pro možnost držení pozice a výšky v exteriéru. Pro koptéru je zamýšlena speciální ochranná antikolizní konstrukce pro případ nárazu. Kromě FPV přenosu videa, by koptéra měla disponovat nahráváním 4K videa při snímkové frekvenci až 120Hz při datovém toku až 150Mbps a ovládatelným gimbalem kamery v rozmezí 180°.

Pořízení potřebných komponent

Poté, co jsem si stanovil cíl a požadavky na koptéru, začal jsem s výběrem potenciálních komponent. Většinu potřebných komponent jsem pořídil ze zahraničních online obchodů.

a) Rám

Rám dronu je konstrukce, většinou z uhlíkové desky s keprovou vazbou vláken nařezaných do různých tvarů, na které jsou namontovány všechny ostatní komponenty. Rám poskytuje mechanickou ochranu veškeré elektronice uvnitř dronu.

Většina ráků má podobný tvar a konstrukci, ale rám dronu může mít znatelný dopad na letové vlastnosti dronu. Nejen hmotnost a aerodynamika, rezonanční frekvence a tuhost mohou ovlivnit, jak dobře bude dron létat.

Měl jsem na výběr z několika variant ráků, moje volba padla na rám typu DeadCat neboli mrtvá kočka. Tento rám je specifický tím, že přední ramena jsou k tělu pod úhlem 90° a jsou lehce posunuta dozadu spolu se zadními rameny, aby kamera umístěná na přední části ráku neměla v záběru vrtule. Z důvodu ochranné klece kolem dronu, je kamera umístěna co nejbližší ke kraji klece. Z toho důvodu jsem vybral rám Explorer 4 od firmy Flywoo, pro 4" vrtule. Tento rám je původně dimenzovaný pro dálkové létání, takzvaný Long Range, a to díky své nízké hmotnosti, pouze 41g. Při použití 4" vrtulí a vhodné baterii, lze zkonstruovat koptéru s letovým časem až 35 minut. Tento rám jsem vybral, protože lze díky speciální vzpěře z uhlíkových vláken zpevnit ramena a eliminovat tak přebytečné vibrace od motorů. Pořizovací cena ráku je 800-1000 Kč vč. DPH.

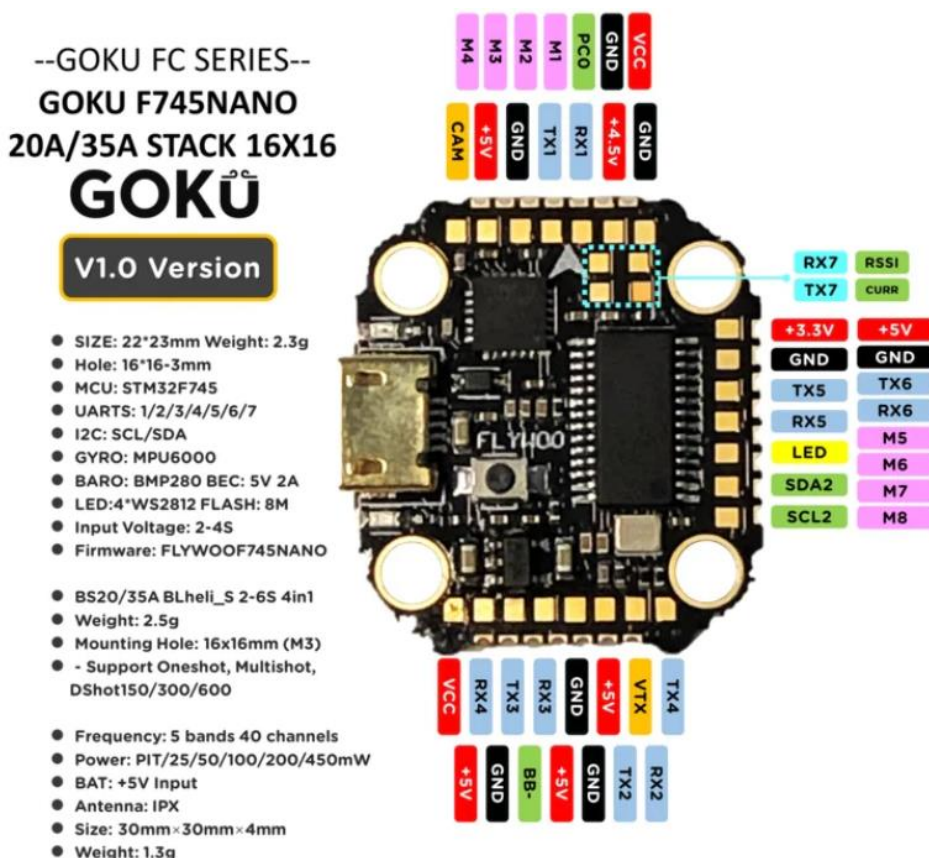


Obrázek 38 - Uhlíkový rám Explorer 4

b) Řídící jednotka - FC

Řídící jednotka „Flight Controller“, zkráceně FC funguje jako mozek koptéry. Kombinace mikroprocesoru, gyroskopu, akcelerometru a signálu z vysílačky neustále vyhodnocuje náklon, úhlovou rychlost a potřebný výkon pro každý motor, aby se dron spolehlivě ovládal a choval stabilně. K řídicí jednotce se připojuje téměř vše od regulátorů, přes přijímač, GPS modul až po LED osvětlení a jiné periferie. Řídící jednotka obsahuje procesor (nejčastěji F4 nebo F7), v některých případech i barometr, blackbox a slot na SD kartu pro záznam letových dat. Na řídicí jednotku lze nainstalovat variaci firmwarů, například Betaflight, INAV, Emuflight, LibrePilot, Ardupilot atd. Všechny tyto softwary mají stejný účel, ale každý má své výhody a nevýhody.

Pro výběr řídicí jednotky jsem měl požadavky na výkonnější verzi procesoru STM32F745 s frekvencí až 216MHz a 1MB Flash paměti, z důvodu, že koptéra bude disponovat větším množstvím senzorů a bude vyžadovat větší výpočetní výkon. Dále jsem vyžadoval plnou podporu firmwaru INAV, alespoň s šesti volnými UARTy pro periférie. Našel jsem vhodnou řídicí jednotku od stejného dodavatele jako rám, jednalo se o řídicí jednotku GOKU F745NANO, která splňovala všechny moje požadavky, navíc váží pouze 2.3 gramu. Pořizovací cena řídicí jednotky je 1000-1400 Kč vč. DPH.



Obrázek 39 - Specifikace a schéma řídicí jednotky GOKU F745NANO

c) GNSS modul

Proto, aby koptéra znala svoji polohu v prostoru (v exteriéru) slouží GNSS (Global Navigation Satellite System) modul. Díky tomuto modulu s anténou lze z družic přijímat signál obsahující data o aktuálním čase, poloze a rychlosti modulu.

Nejznámějšími systémy GNSS jsou GPS (Global Positioning System) Spojených států, GLONASS (Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema) Ruska, Galileo Evropské unie a další. Princip fungování GNSS spočívá v triangulaci signálů z jednotlivých satelitů.

Protože koptéra musí zvládat držení polohy, výšky a případný návrat při ztrátě signálu, bylo zařazení GNSS modulu do výbavy dronu samozřejmostí.

Vybral jsem GNSS modul středních rozměrů s integrovaným kompasem MG-A01 M10 a výpočetním čipem M10 zaručující rychlé načtení satelitů. Firmware INAV, který běží na řídicí jednotce vyžaduje kompas pro určení směru koptéry při držení polohy a výšky. Celý GNSS modul i s anténou má rozměry 25*25*4mm a váží 12 gramů. Podporuje GNSS systémy GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou. Pořizovací cena modulu je 400-500 Kč vč. DPH.



Obrázek 40 - GNSS modul MG-A01 M10 s kompasem

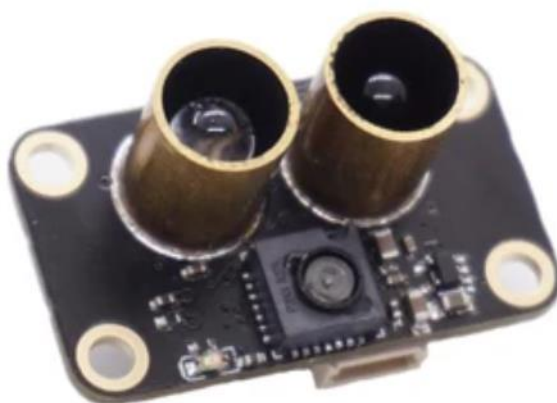
d) LiDAR s Optical Flow senzorem

Aby koptéra zvládla držet svoji polohu v prostoru i mimo dosah globálního navigačního systému (v interiéru), lze využít senzorů dálkového měření LiDAR. LiDAR je zkratka pro „Light Detection and Ranging“ metodu dálkového měření vzdálenosti na základě výpočtu doby šíření pulsu laserového paprsku odraženého od snímaného objektu. Sensory LiDAR fungují tak, že vysílají světelné impulsy a měří čas potřebný k jejich zpětnému odrazu od země, spolu s intenzitou.

Protože využití LiDAR senzorů pro udržení koptéry na místě by vyžadovalo umístit několik senzorů do všech stran, rozhodl jsem se pro jiné řešení. Místo několika LiDAR senzorů jsem umístil jeden LiDAR do spodní části koptéry, pro držení konstantní výšky, tedy vertikální polohy a ten jsem doplnil o Optical Flow senzor.

Principem Optical Flow je sledování pohybu okolního prostředí pomocí snímání pohybu objektů v zorném poli kamery. Kamera zachycuje sérii snímků a sleduje, jak se objekty na těchto snímcích mění nebo pohybují. Na základě těchto změn v obrazech senzor určuje směr a rychlost pohybu. To umožňuje koptěře udržovat stabilní polohu ve vodorovném směru.

Vybral jsem tedy LiDAR s Optical Flow senzorem MTF-01 od firmy MicoAir Technology. Celý modul váží pouhých 4.5 gramu a jeho rozměry jsou 29x17x15mm s maximální frekvencí snímání až 100Hz. Pořizovací cena modulu je 400-600 Kč vč. DPH.



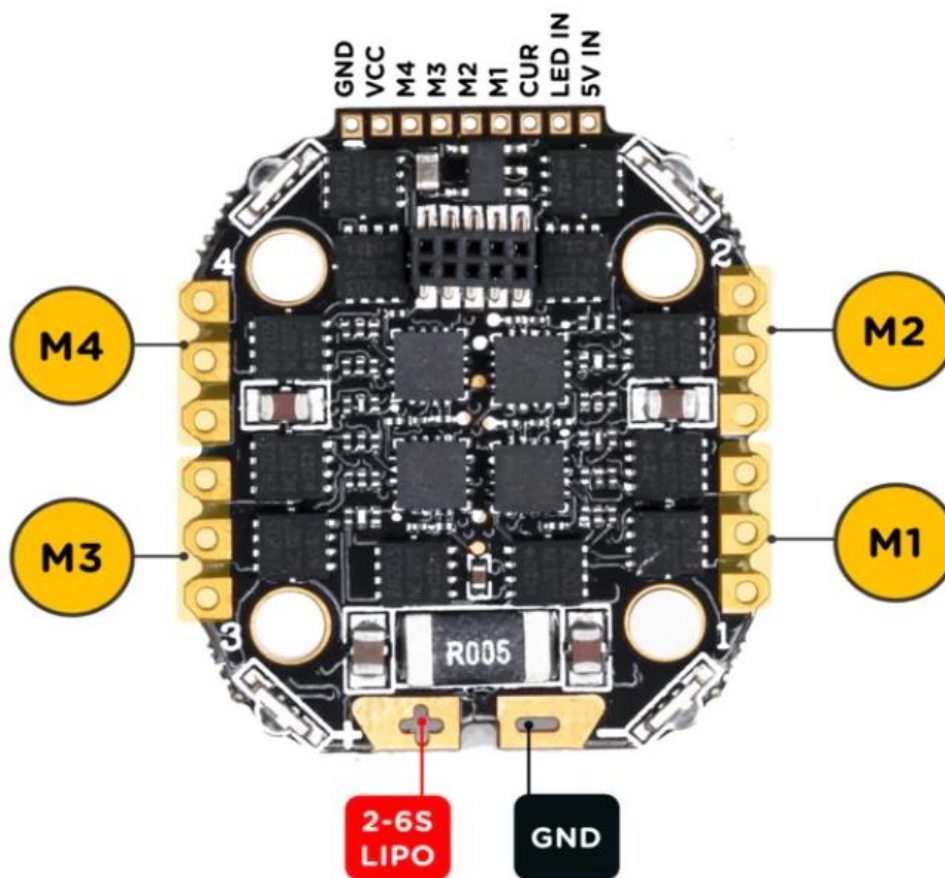
Obrázek 41 - LiDAR s Optical Flow senzorem MTF-01

e) Regulátor otáček motorů - ESC

Regulátor otáček motorů „Electronic speed control“, zkráceně ESC, je zodpovědný za řízení rychlosti otáček motorů na koptěře. Regulátor je napájen stejnosměrným proudem z baterie a přijímá signály motoru z řídicí jednotky a poskytuje třífázový střídavý proud, který pohání motor a uvádí tak vrtule do pohybu.

Regulátory se vyrábějí v několika provedeních, mohou být samostatné pro umístění na ramena koptěry pro každý motor zvlášť nebo ve variantě 4v1, kdy je čtveřice regulátorů umístěná na jedné desce, nejčastěji umístěné přímo pod řídicí jednotkou.

Zvolil jsem variantu regulátoru 4v1 kvůli menší hmotnosti, pouze 2.5 gramů a kompaktním rozměrům. Vybral jsem regulátor GOKU 4IN1 ESC 20A/35A ve stejném rozměru jako FC. Jak je z dvou hodnot v názvu patrné 20A udává maximální kontinuální odběr na větev regulátoru a 35A je krátkodobý maximální odběr. Regulátor podporuje vstupní napětí 2-6 článkové baterie, tedy 7-26V. Pořizovací cena regulátoru je 800-1000 Kč vč. DPH.



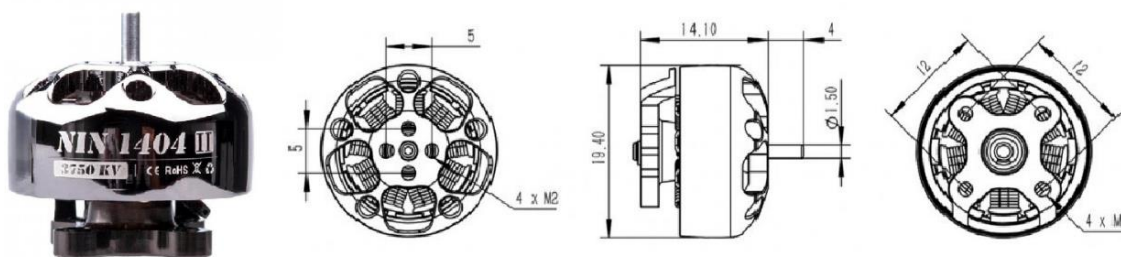
Obrázek 42 - Regulátor GOKU 4IN1 ESC 20A

f) Motory

Pro koptéry se používají bezkomutátorové motory, ty se obvykle značí čtyřmístným číslem ve formátu XXYY, které značí rozměr statoru v milimetrech, XX číslice jsou šířka statoru a YY číslice značí výšku statoru. Stator je stacionární část motoru, skládající se z „pólů“ obmotaných měděnými dráty tzv. vinutím cívk.

Ve chvíli, kdy elektrický proud prochází cívkami statoru, generuje magnetické pole, které magneticky působí na permanentní magnety na rotoru a roztáčí motor. Množství vinutí cívk, respektive počet obvinutí stanovuje hodnotu KV neboli počet otáček za minutu na 1 volt. Obecně platí, že vyšší počet závitů vinutí snižuje KV motoru, zatímco nižší počet závitů jej zvyšuje. Magnetická síla magnetů může také ovlivnit hodnotu KV, přičemž silnější magnety KV zvyšují.

Motory pro tento projekt jsem vybral NIN 1404 V2 2750Kv, protože dle datasheetu motorů je tento motor nejefektivnější při použití 4" vrtulí a 4S baterie. Motor má montážní otvory 12x12 mm, kompatibilní s vybraným rámem. Navíc motor má 1.5 mm osičku pro vrtuli, což šetří hmotnost. Běžně u větších motorů je zvykem používat 3 mm osičku se závitem a vrtule je držena M5 matkou. Pořizovací cena čtveřice motorů je 1800-2000 Kč vč. DPH.



Obrázek 43 - Schéma motoru NIN 1404 V2 2750Kv

g) Video vysílač – VTX

Video vysílač slouží k přenosu obrazu, případně i zvuku z kamery na vzdálenější místo, například do brýlí nebo do monitoru, který sleduje operátor. Video vysílače mají různé frekvence vysílání a výkony. Obvykle pracují na určitých radiových frekvencích (například 5,8 GHz) a mají různé výkony, což ovlivňuje dosah signálu a jeho stabilitu. Kvalita přenášeného obrazu závisí na kvalitě vysílače, výkonu, anténách a rušení. Některé vysílače mají lepší šířku pásma a mohou přenášet obraz ve vyšších rozlišeních a s menšími ztrátami.

Obecně jsou na trhu dva druhy video přenosů, analogový a digitální. Analogový video systém obvykle pracuje s určitými rozlišeními, která jsou nižší než digitální rozlišení. Analogový video přenos se stále používá ve světě FPV, a to kvůli své nízké latenci a menší pořizovací ceně. Analogový video signál pracuje na jednosměrné komunikaci, tedy vysílaný signál může mít neomezený počet přijímačů, stačí aby přijímal na správné frekvenci a kanále.

Digitální přenos videa funguje na obousměrné komunikaci, tedy video vysílač posílá komprimovaná data do přijímače, kde jsou extrahována a zobrazována, a brýle zároveň posílají pokyny video vysílači, aby například zaslal znovu určité pakety, které brýle neobdrželi. Na trhu je několik digitálních systémů, v FPV komunitě je nejpoužívanější DJI HD FPV systém a Walksnail Avatar HD systém. Oba systémy si konkurují, každý má své výhody a nevýhody. Nicméně oba systémy jsou schopny odesílat obraz o rozlišení 1080p při snímkové frekvenci až 120Hz s datovým tokem 50Mbps při latenci okolo 30ms. I když digitální technologie postupně roste v popularitě, analogové video systémy zůstávají oblíbenou volbou.



Obrázek 44 - Ukázka analogového a digitálního video přenosu

Pro tento projekt jsem vybral digitální systém od firmy DJI. Důvodem bylo, že na základě mých osobních zkušeností má DJI lepší penetraci materiálem a o něco lepší kvalitu obrazu ve složitějších scénériích.

Konkrétně jsem vybral video vysílač s kamerou DJI O3 Air Unit, která nabízí přenos obrazu v rozlišení až 1080p při snímkové frekvenci 120Hz, latencí 30ms, datovým tokem 50Mbps a kódováním H.265. Video vysílač vysílá na frekvenci 5.8GHz při šířce pásma až 40MHz. Obraz zajišťuje kamera se 1/1,7" snímačem a zorným úhlem 155°. Vysílač s kamerou váží 39 gramů a má rozměry 30,5x30,5x14,5 mm. Důležitým aspektem tohoto vysílače je možnost nahrávat video v rozlišení až 4K/60Hz. Obraz může být stabilizovaný interní DJI stabilizací RockSteady nebo později v postprodukcí pomocí open-source programu Gyroflow. DJI O3 totiž kromě videa nahrává i data z gyroskopu. Kamera tohoto video vysílače bude umístěna na přední části koptéry na pohyblivém gimbalu s možností náklonu nahoru a dolů v rozmezí 170°. Pořizovací cena DJI O3 Air Unit je 6000-6500 Kč vč. DPH.



Obrázek 45 - DJI O3 Air Unit

h) Video přijímač – VRX

Video přijímač slouží k přijímání video signálu, který je následně poslán do brýlí nebo obrazovky, kterou sleduje operátor. Video přijímač může být externí nebo již integrovaný v brýlích či monitoru. Každý přijímač je uzpůsoben pro příjem dané frekvence pomocí přijímacích antén. Běžná praxe je, že na přijímač se umísťují směrové antény, které mají větší zisk signálu za předpokladu, že trasa vysílače je naplánovaná na trase, kam tato směrová anténa míří. Kvalitní přijímače video signálu disponují většinou dvěma nebo čtyřmi anténními vstupy, takže lze kombinovat směrové a všesměrové antény.



Obrázek 46 - Analogové FPV brýle Skyzone SKY020

Pro DJI FPV HD systém jsem měl na výběr mezi pořízením starších DJI Goggles V2 a nejnovějšími DJI Goggles 2. Vybral jsem DJI Goggles 2 z důvodu novější technologie přenosu videa O3 a lepších FullHD Micro OLED displejů, takže lze plně využít potenciál O3 Air Unity. Goggles 2 jsou navíc kompaktnější a lehčí než předešlý model a disponují integrovanou korekcí dioptrií, kterou lze provést jednoduchým otočením koleček na spodní části brýlí. Brýle disponují celkem čtyřmi anténami, dvě jsou integrovány v masce brýlí a měly by plnit funkci směrových antén a dvě jsou na horní části brýlí jakožto všesměrové skládací antény. Pořizovací cena DJI Goggles 2 je 15 900-16 900 Kč vč. DPH.

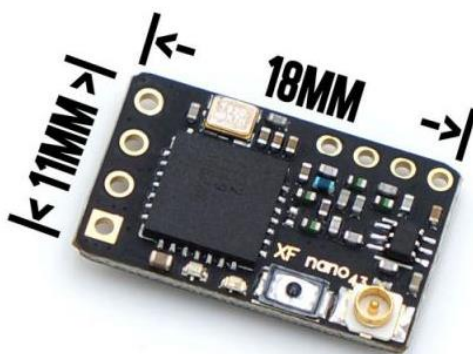


Obrázek 47 - Digitální FPV brýle DJI Goggles 2

i) RC Přijímač - RX

RC přijímač je důležitou komponentou v každém RC modelu, bez něj by model nemohl přijímat příkazy od operátora. Přijímače rozlišujeme podle počtu kanálů a jaký druh signálu má přijímač na výstupu do řídicí jednotky. Do koptér se doporučují sériové protokoly (všechna data se odesílají po jednom vodiči) a řídicí jednotka si je dekoduje a rozdělí jako data jednotlivých kanálů. Běžná praxe u modelů, které nedisponují řídicí jednotkou je, že přijímač má PWM výstupy ve stejném počtu, kolik přijímač zvládá kanálů a každý PWM výstup odesílá data pouze pro jeden kanál. Toto řešení je v našem případě nepřijatelné z důvodu hmotnosti a komplikovanému provedení. Navíc tyto PWM přijímače jsou většinou dimenzované pro RC modely řízené na LOS neboli Line-of-sight, tedy na dohled operátora. Což u modelů menších rozměrů, jako jsou koptéry, bývá jen několik desítek metrů, takže přijímače nemají o nic větší dosah, navíc nepočítají s překážkami mezi operátorem a strojem.

Vybíral jsem mezi RC systémem Crossfire pracujícím na UHF frekvenci 868MHz od firmy TeamBlackSheep a open-source projektem ExpressLRS běžícím na 2.4GHz nebo 868MHz. I přes mnohé výhody systému ExpressLRS, jako je například novější technologie, menší odezva, vyšší obnovovací frekvence (až 1000Hz) a menší pořizovací cena díky open-source licenci, jsem vybral lety ověřený a vyladěný systém TBS Crossfire na 868MHz, protože na účely sestavované inspekční koptéry jeho parametry bohatě vystačí. Oba systémy nemají problém s dosahem několik desítek kilometrů a dokáží si dobře poradit s penetrací materiálem. V případě že by v budoucnu bylo potřeba změnit RC systém, jednalo by se o rychlou výměnu, protože oba systémy pracují na protokolu CRSF, který řídicí jednotka podporuje.



Obrázek 48 - Přijímač TBS Crossfire Nano RX

Přesný model přijímače jsem vybral Crossfire Nano RX, jedná se o dvanácti kanálový přijímač s telemetrií, tedy komunikace mezi vysílačem a přijímačem je obousměrná. Díky tomu mohou během letu sbírat nebo zobrazovat telemetrická data bezdrátově a v reálném čase do vysílače a následně do vysílačky. Přijímač Crossfire Nano RX má velmi malé rozměry, a to 11x18x1.5mm a váží pouze 0,5g. Přijímač je napájen 3.3 až 8.4V. Pořizovací cena RC přijímače je 600-800 Kč vč. DPH.



Obrázek 49 - Přijímač TBS Crossfire Nano RX s Immortal-T anténou

j) RC Vysílač - TX

Vysílač RC signálu slouží k vysílání signálu, který v sobě nese informace o poloze páček (gimbalů), přepínačů a jiných ovládacích prvků na vysílače. Tyto signály jsou přijímány RC přijímačem. I přesto, že většina modelářských RC vysílačů vysílá na frekvenci 2.4GHz nebo 868MHz, nejsou zdaleka vzájemně kompatibilní napříč výrobci. Proto se většinou jedná o uzavřené systémy. Vysílač může být integrovaný ve vysílače nebo může být do vysílačky připojen jako externí modul, pokud vysílačka podporuje externí moduly. Většinou jsou externí přijímače připojeny takzvanou JR šachtou na zadní straně vysílačky. Externí moduly mají výhodu v rychlé a snadné výměně, takže v případě nějaké inovace v RC systémech lze jednoduše vysílač vyměnit a tím přejít na novější RC systém.



Obrázek 50 - RC vysílačka s externím Crossfire modulem v JR šachtě

Protože jsem zvolil jako RC systém Crossfire na 868MHz, vybral jsem vysílač TBS Crossfire Micro TX V2, který má vysílací výkon až 1W. Tento výkon umí vysílač automaticky regulovat podle potřeby. Vysílač má formát kompatibilní JR šachtou většiny vysílaček, takže instalace byla snadná a díky doladěnému přidruženému softwaru i následná konfigurace a párování s přijímačem. Pořizovací cena RC vysílače je 1200-1500 Kč vč. DPH.



Obrázek 51 - RC Vysílač TBS Crossfire Micro TX V2

k) RC Vysílačka – RC Controller

RC vysílačka je prostředek, jak co nejpřirozenějším a nejpraktičtějším způsobem vysílati RC signálu předávat data, které pilot vytváří pohyby páček a přepínačů. RC vysílačky se liší rozměry, kvalitou zpracování a druhem interního vysílače. Pro každé účely existují specifické vysílačky a každému operátorovi sedí jiný typ controlleru. Někteří operátoři preferují kompaktní rozměry vysílačky, například ve tvaru herního ovladače. Tyto vysílačky mají většinou menší gimbaly uzpůsobené pro ovládání palci (thumbing) a menší počet přepínačů z důvodu kompaktních rozměrů. Dále existují tzv. hybridní rozměry, tyto vysílačky už mohou disponovat full size gimbaly a větším počtem přepínačů, ale lze tuto vysílačku ovládat jak palci, tak i pultově palcem a ukazováčkem tzv. (pinching). Poslední typ jsou velké modelářské vysílačky, ty už je obtížné ovládat palci, jsou dimenzované na zavěšení na krk, mají velký počet přepínačů a jsou prémiově vybavené, některé mají dokonce dotykový displej.



Obrázek 52 - RC vysílačka Radiomaster TX16S

Osobně preferuji ovládání gimbalů palci a kompaktní rozměry, avšak chtěl jsem full size gimbaly. Vybral jsem tedy vysílačku Radiomaster Boxer hybridních rozměrů s integrovaným ELRS vysílačem s výkonem až 1W. Vysílačka má dostatečné množství přepínačů pro koptéry, příjemnou hmotnost a JR šachtu pro externí modul. Boxer má poměrně velký displej pro možné zobrazení telemetrických dat a disponuje dvěma otočnými potenciometry, například pro ovládání náklonu gimbalu kamery. Vysílačka je napájena dvoučlánkovou baterií o kapacitě až 4000mAh pro provoz až šest hodin a lze ji nabíjet pomocí USB-C standardem Power Delivery 3.0. Pořizovací cena vysílačky je 4500-5000 Kč vč. DPH.



Obrázek 53 - RC vysílačka Radiomaster Boxer

I) Ochranná klec

Ochranná klec kolem dronu slouží jako součást antikolizního systému koptéry. Zajišťuje, aby se rotující vrtule nedostaly do kontaktu s překážkami a lidmi. V případě, že by se za letu nějaká struktura dostala do kontaktu s rotující vrtulí, koptéra by okamžitě ztratila stabilitu. Existuje několik způsobů, jak u koptér ochránit vrtule, nejčastěji se používají tzv. bumpery neboli chrániče vrtulí po obvodu dráhy vrtule. Tyto chrániče mají výhodu v menší hmotnosti a v tom, že nijak neblokují proudící vzduch přicházející a odcházející z rotorů. Avšak jejich nevýhoda je taková, že koptéra je stále zranitelná z ostatních směrů.



Obrázek 54 - Cinewhoop s chrániči vrtulí

Proto jsem navrhl použít ochranu atmosféru kolem celé koptéry, která dovoluje narážet do překážek po celém svém obvodu. Díky této konstrukci je navíc možné kdekoliv přistát a v případě pádu a následného kutálení umožnit dronu dostat se do vhodné polohy a natočení pro opětovné vzletnutí. Prototyp ochranné klece je zkonstruován z materiálu PLA, resp. z profilů vytištěných na 3D tiskárně o průměru 3 mm spojených 3D tištěnými spojkami, které tvoří polygony, takže jednotlivé segmenty jsou tvořeny z trojúhelníkových segmentů, z nichž je pak sestavena prostorová konstrukce, vykazující vysokou tuhost a odolnost. Pořizovací cena ochranné klece je 100-200 Kč vč. DPH.



Obrázek 55 - Prototypy ochranných klecí

m) Baterie

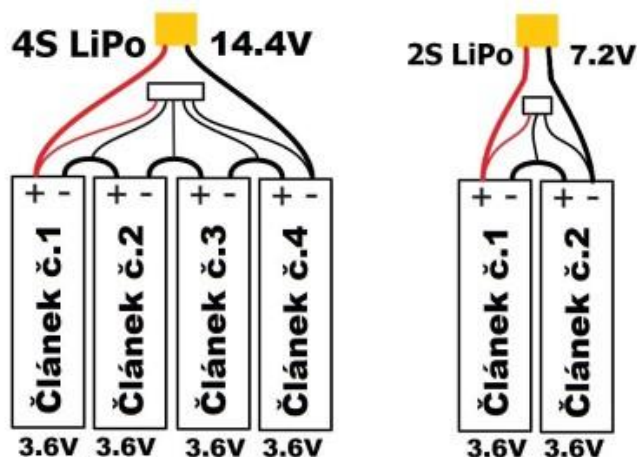
Aby měly motory koptéry dostatečný výkon k letu, je třeba jim dodat dostatek elektrické energie, a k tomu slouží baterie. Koptéry využívají především baterie, založené na Li-Pol technologii (Lithium Polymer), která zajišťuje vysoký výkon a kapacitu při zachování kompaktních rozměrů. Lze využít i baterie typu Li-Ion (Lithium Iontové) pro stroje s menším kontinuálním odběrem, Li-Ion baterie nedokáží poskytnout tak velký proud jako Li-Pol baterie, avšak zato mají větší energetickou hustotu.



Obrázek 56 - Lithiové články baterie

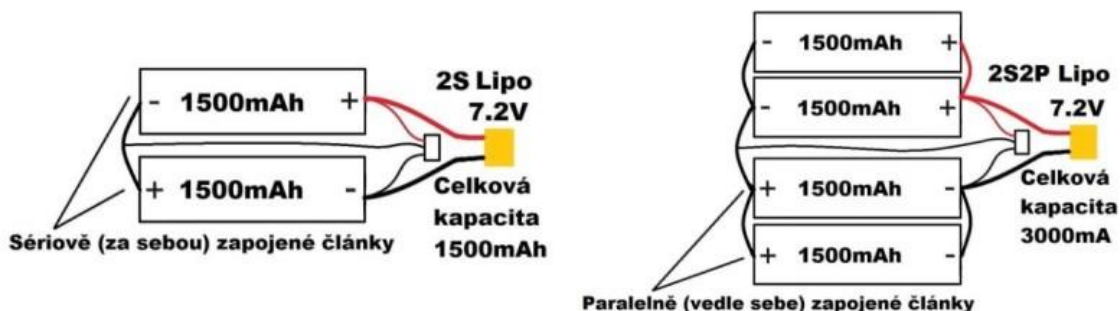
Baterii (akumulátor) si ve většině případů můžeme představit jako několik tzv. článků propojených mezi sebou. Propojené jsou buď sériově nebo paralelně, popř. kombinace. Baterie pro koptéry podle článků dělíme nejčastěji na 1S - 6S. Pokud je v názvu baterie například 4S, jsou články spojeny sériově. To znamená, že 4S baterie (pro naše účely uvažujme 4S 1500mAh Li-pol baterii) se skládá ze čtyř stejných článků, kdy každý má kapacitu 1500mAh.

Tyto články jsou spojeny sériově, tedy každý článek má svojí anodu a katodu (+ “plus” kladný pól a - “mínus” záporný pól), kdy článek č.1 je svým plusem spojen s mínusem článku č.2, článek č.2 je totožně spojen s článkem č.3 a taktéž stejně i článek č.4. Z toho vyplývá, že po změření z plusu článku č.1 a mínusu článku č.4 naměříme napětí rovnající se součtu napětí jednotlivých článků. Plně nabitá baterie má napětí 4,2V na článek, v našem případě tedy celkové napětí bude $4 \times 4,2V = 16,8 V$, což je napětí plně nabité 4S baterie.



Obrázek 57 - Schéma 4S a 2S baterie

S počtem článků souvisí existence balančního konektoru. Ten se využívá pro vyrovnávání napětí na jednotlivých článcích akumulátoru při nabíjení. Jestliže je v názvu 2S2P, baterie se skládá ze dvou dvojic článků. Jednotlivé články ve dvojici jsou mezi sebou spojeny sériově „S“ a tyto dvojice jsou ještě spojeny paralelně „P“. Paralelně zapojené články nezvyšují napětí, ale kapacitu a maximální proud článků se sčítá.



Obrázek 58 - Schéma sériově a paralelně zapojených článků

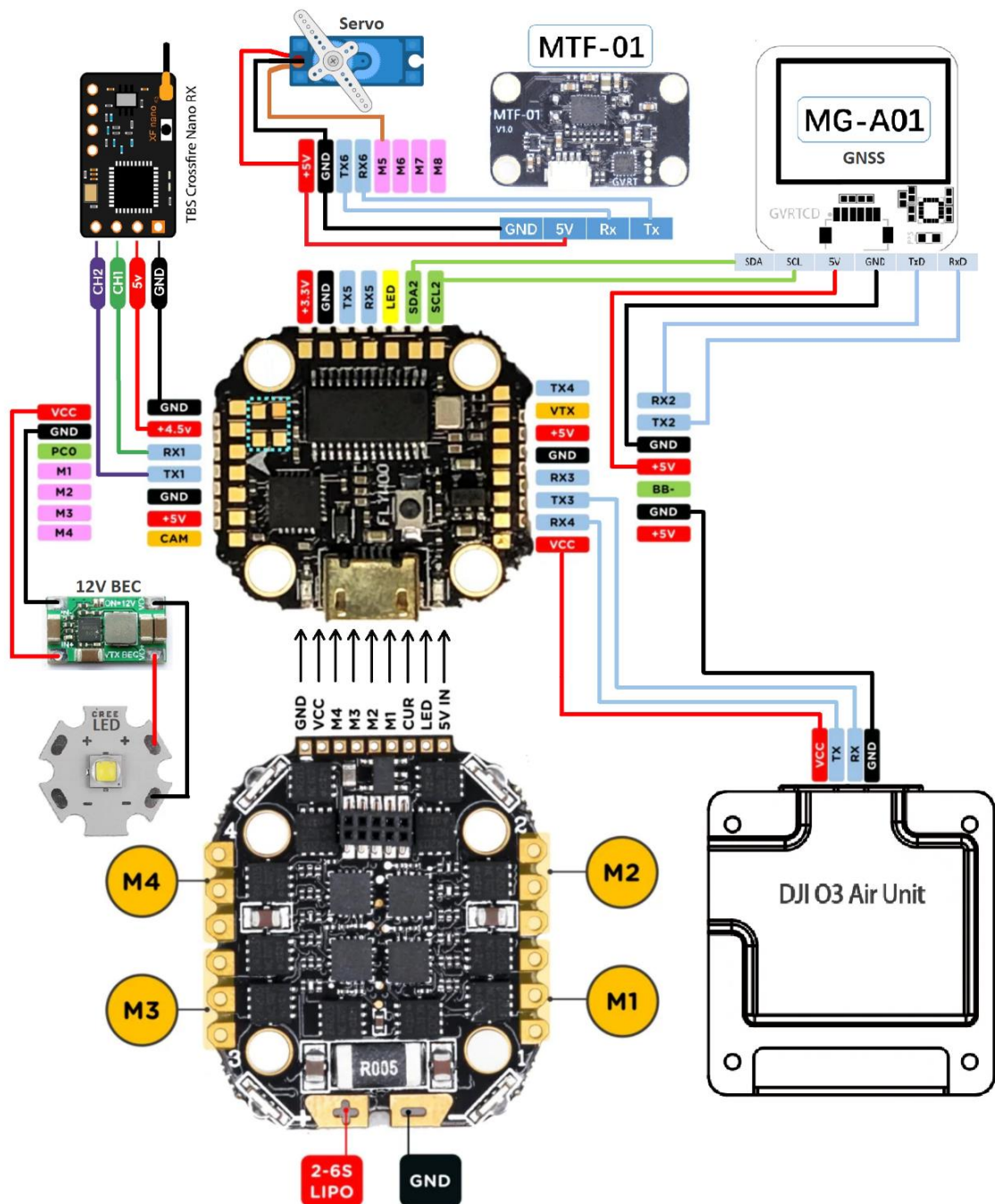
Protože je koptéra dimenzována na úsporný a plynulý let s odběrem pod 20A, zvolil jsem baterii s technologií Li-Ion, a to čtyř článkovou baterii z článků 18650, přesněji model US18650VTC6 od výrobce Sony. Tyto články mají kapacitu 3120mAh při hmotnosti 47 gramů a rozměru $\varnothing 18,2 \times 65$ mm. To znamená, že celý bateriový pack má hmotnost okolo 200 gramů. Pro představu běžná 4S Li-Po baterie o hmotnosti 190 gramů má kapacitu 1500mAh. Tedy Li-Ion pack má dvojnásobnou kapacitu při stejné hmotnosti jako Li-Po baterie. Pořizovací cena Li-Ion bateriového packu je 800-1200 Kč vč. DPH.



Obrázek 59 - 4S 1500mAh Li-Po a 3000mAh Li-Ion baterie

5. Stavba koptéry - metodika

Po pořízení všech potřebných komponent, bylo možné se pustit do stavby inspekční koptéry. Během stavby byly využity následující nástroje a pomůcky: Imbusový klíč 1,5 mm a 2 mm, pinzeta, kleště, štípací kleště, skalpel, plastové stahovací pásky, oboustranná lepící páska, dřevěné špejle průměr 3 mm, pájecí pero, olovnatá pájka, tavidlo, napájecí zdroj, modelářská nabíječka, sada silikonové kabeláže 28AWG, smršťovací bužírky, 3D tiskárna, multimetr, epoxidové lepidlo, zapalovač.



Obrázek 60 - Schéma zapojení autorovi inspekční koptéry

a) Montáž rámu

Prvním krokem při stavbě koptéry je sestavení uhlíkového rámu, na který se následně osadí zbylé komponenty. Rám koptéry se skládá ze čtyř ramen, dvou rozpěr, sloupků, spodního a horního plata, které se sešroubují imbusovými šrouby M2, do zalisovaných mosazných matic, nebo sloupků. Celý rám je sestaven až na rozpěry ramen, které bez motorů zatím nelze připevnit a horního plata, které doplníme, až dokončíme vnitřní elektroinstalaci pro lepší přístup.



Obrázek 61 - Montáž uhlíkového rámu

b) Montáž motorů

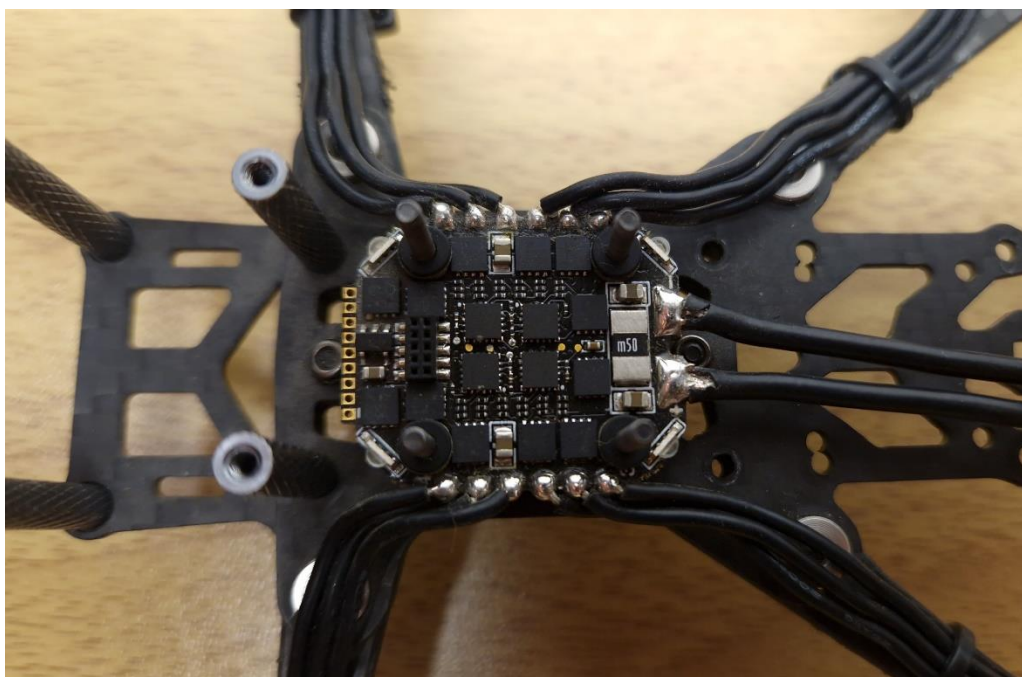
Dalším krokem je přišroubování motorů na spodní stranu ramen M2 imbusovými šrouby. Těmito šrouby zároveň připevníme rozpěry ramen a prodloužení ramen pro pozdější konstrukci ochranné klece. Po připevnění motorů si přichytíme kabeláž od motorů v polovině délky ramene, pomocí plastových stahovacích pásek.



Obrázek 62 - Uchycení motoru k rameni

c) Připájení regulátoru otáček motoru

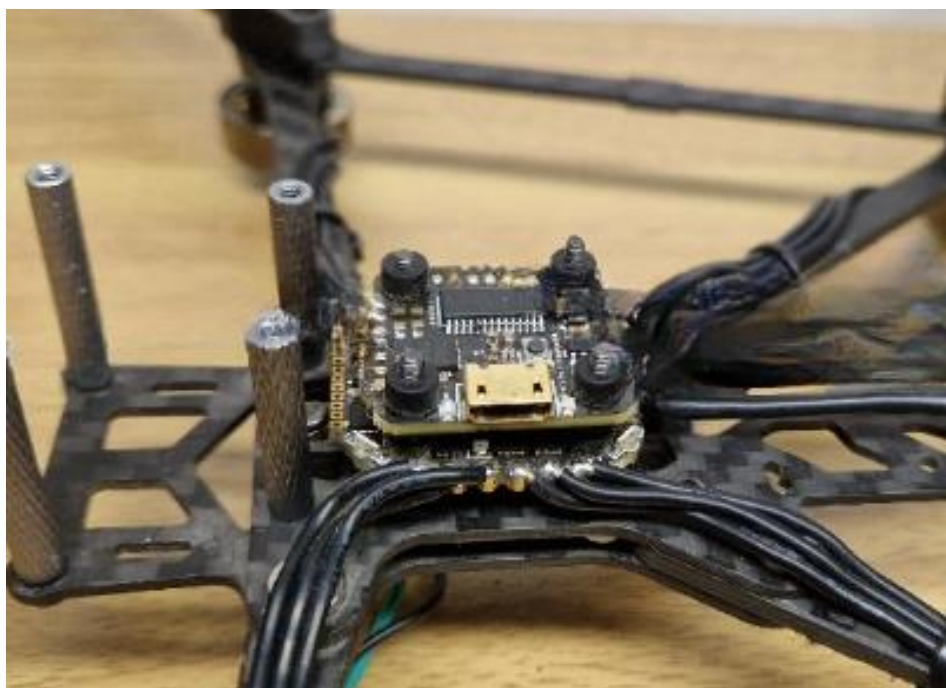
Na spodní plato, přímo mezi rameny, se nachází montážní otvory 16x16 mm pro upevnění regulátoru a řídicí jednotky. K montáži regulátoru jsou použity 22 mm dlouhé M2 imbusové šrouby, protaženy skrze montážní otvory. Mezi spodní plato rámu a regulátor umístíme distanční sloupky dodávané k regulátoru a na ně následně umístíme regulátor, na který napájíme napájecí kabeláž s konektorem XT30 pro napájení z baterie. Konektor XT30 zvládne zatížení až 30A, což je dostatečný horní limit odběru naší koptéry. Napájecí kabeláž směřuje do zadní části koptéry a je dostatečně dlouhá, aby dosáhla až nad horní plato, kde bude umístěna baterie. Kabeláž od motorů si zkrátíme na požadovanou délku k pájecím ploškám na regulátoru. Následně si nanese cín na konec kabeláže a na pájecí plochy na regulátoru. Regulátor disponuje čtyřmi větvemi pro čtyři motory, každý motor má tři vodiče, které je potřeba v libovolném pořadí připájet na jednotlivé větve regulátoru. Pořadí vodičů, určuje směr otáčení motorů, směr si ale můžeme případně softwarově změnit.



Obrázek 63 - Umístění regulátoru otáček motoru

d) Umístění řídicí jednotky

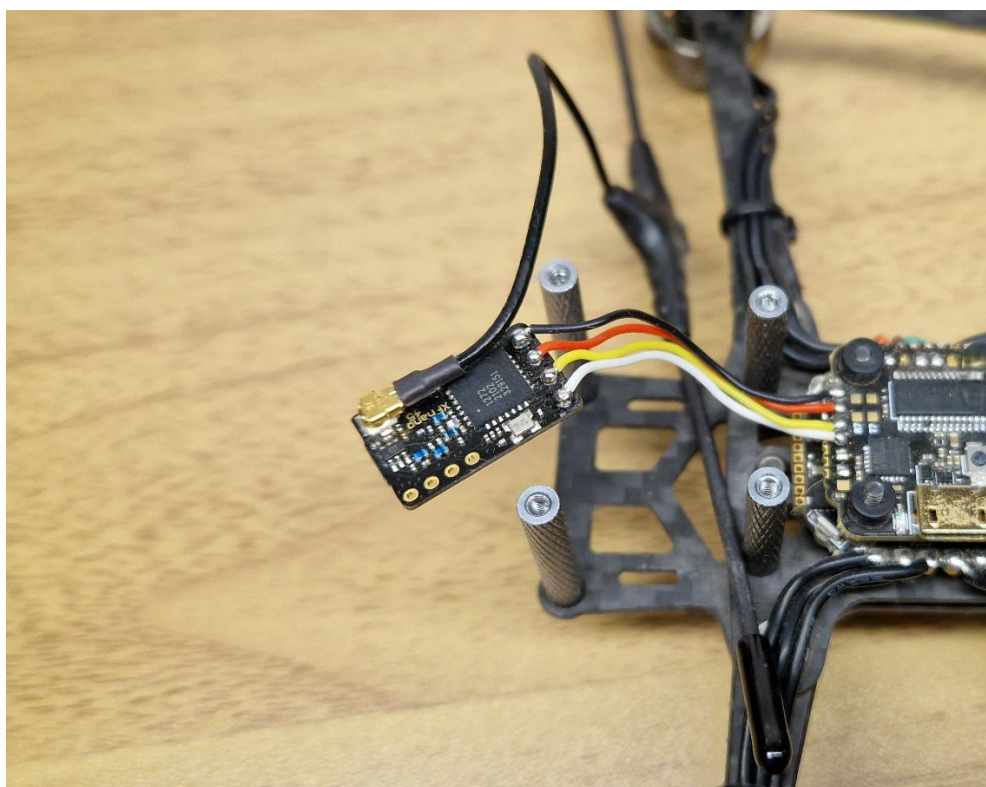
Nyní si můžeme na distanční sloupky umístit řídicí jednotku přímo nad regulátor, se kterým se řídicí jednotka spojí osmi pinovým svislým konektorem. Tento konektor slouží pro komunikaci a napájení mezi řídicí jednotkou a regulátorem. Konektor obsahuje čtyři piny pro výstup motoru 1 až 4, dva piny, které vedou napětí baterie do řídicí jednotky a dva piny pro senzor proudu regulátoru a obousměrnou komunikaci pro případné nastavování regulátoru skrze řídicí jednotku, pomocí Micro-USB konektoru na řídicí jednotce.



Obrázek 64 - Řídicí jednotka osazena nad regulátor

a) Připojení RC přijímače

Nyní, když máme umístěnou řídicí jednotku, můžeme k ní připojit všechny periferie. Začneme RC přijímačem TBS Crossfire Nano RX. Nejprve si připravíme cín na pájecí plošky přijímače a následně si na ně připájíme dostatečně dlouhou 28AWG kabeláž a připojíme anténu pomocí U.FI konektoru. U kabeláže dodržujeme, že černý vodič jde na GND (ground) a červený vodič na 5V vstup pro napájení, zbylé vodiče můžeme vybrat libovolnou barvu. Celý přijímač si zatavíme do smršťovací bužírky tak, aby bužírka zafixovala konektor antény a pájecí plošky kabeláže. Kabeláž zkrátíme na požadovanou délku a připájíme ji na řídicí jednotku, tedy 5V připájíme na 5V výstup, GND na plošku GND, TX z přijímače na RX1 a RX z přijímače na TX1. TX (transmit) pad znázorňuje vysílací pad, tedy pad, kterým se vysílají data ven ze zařízení a RX (receive) jako přijímací pad, kterým jsou data přijímána. Tato dvojice se nazývá UART (Universal asynchronous receiver-transmitter) sběrnice sloužící pro asynchronní sériový přenos dat.



Obrázek 65 - Připájený RC přijímač s anténou

b) Připojení GNSS modulu

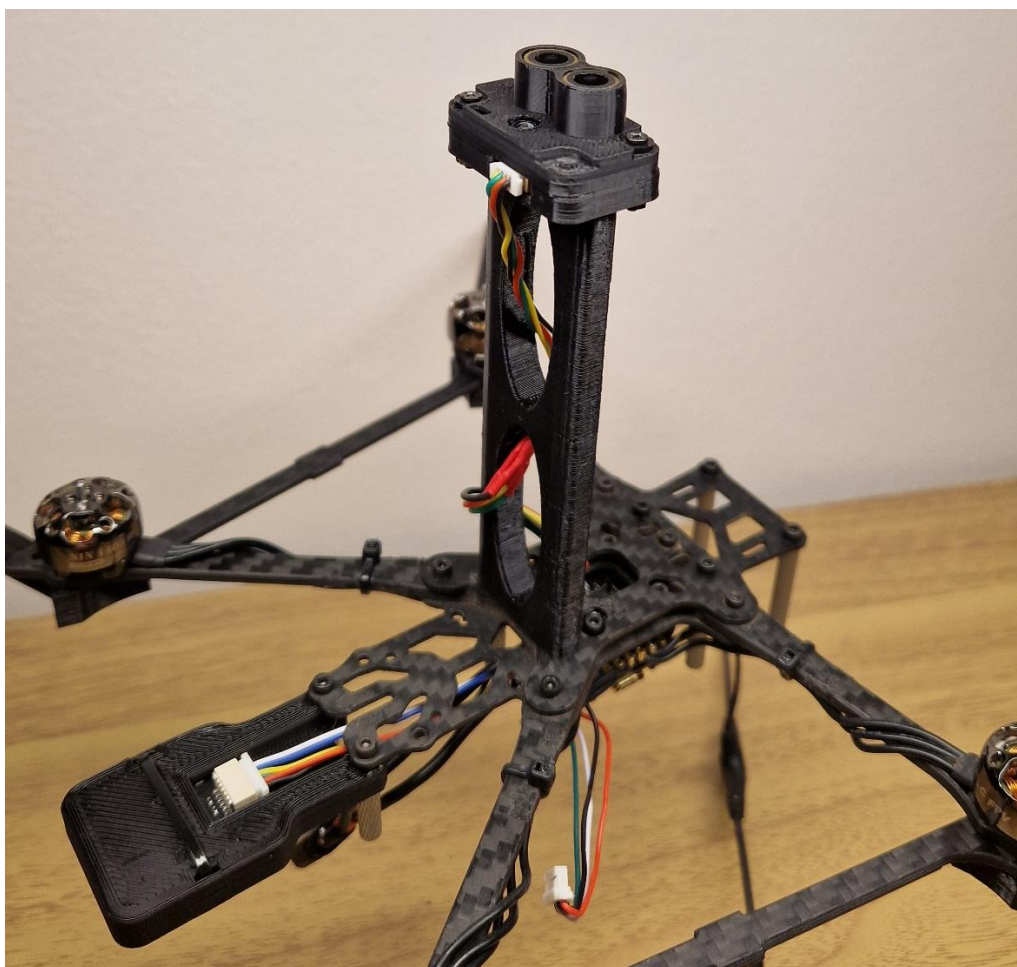
GNSS modul je potřeba umístit na místo, kde mu nebude blokován signál z družic. Zároveň kvůli integrovanému kompasu je potřeba modul umístit dostatečně daleko od napájecí kabeláže, kovových částí a zdrojů elektromagnetického rušení, které generují například motory. Pro umístění modulu se zdálo příhodné místo na zadní části rámu. Navrhl a vymodeloval jsem tedy model platformy pro modul, který jsem následně vytiskl na 3D tiskárně. Modul jsem do platformy umístil na pěnovou oboustrannou lepící pásku a pojistil ji stahovací plastovou páskou. GNSS modul obsahuje šesti pinový konektor pro zjednodušení napojení k řídicí jednotce, konektor obsahuje kabeláž 5V, GND, RX, TX, SCL a SDA. 5V a GND vedeme na napájení z řídicí jednotky, RX a TX na UART2 na řídicí jednotce. SCL a SDA slouží k napojení I²C (Inter-Integrated Circuit) obvodu, tento obvod slouží pro komunikaci nízkorychlostních periférií, v tomto případě integrovaného magnetometru neboli kompasu. Tuto kabeláž vedeme na pady SCL a SDA na řídicí jednotce.



Obrázek 66 - Upevnění GNSS modulu do 3D tištěné platformy

c) Připojení LiDAR s Optical Flow senzorem

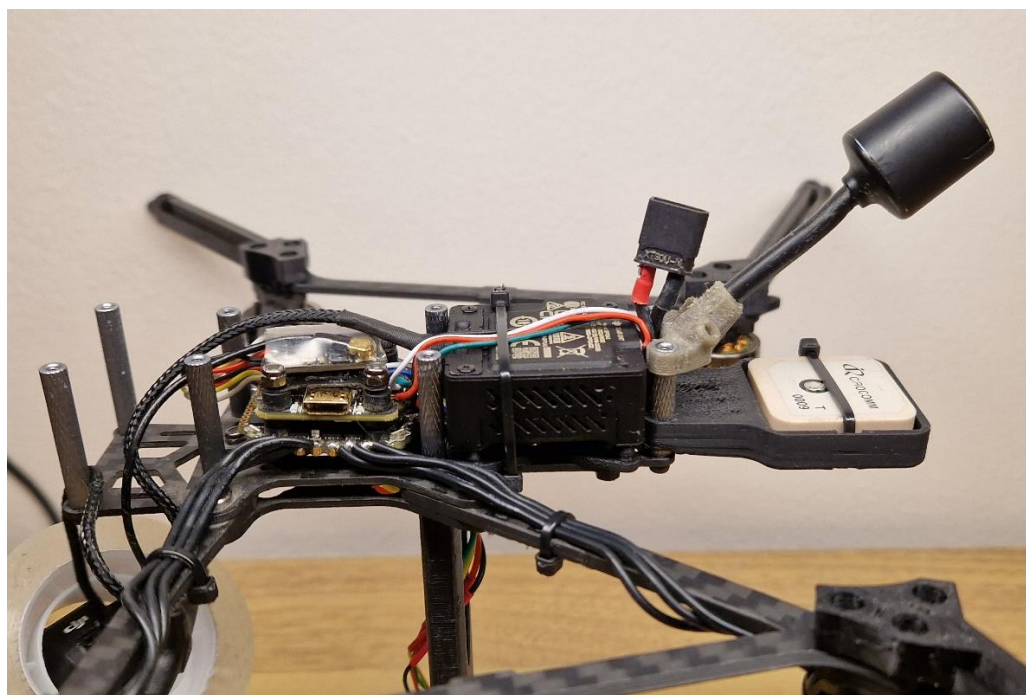
LiDAR s Optical Flow senzorem je potřeba umístit na spodní část koptéry tak, aby pohled Optical Flow senzoru byl co nejméně blokován ochrannou klecí, proto jsem pro senzor vymodeloval a vytiskl na 3D tiskárně platformu, díky které bylo možné senzor vyvést 7 cm pod spodní plato koptéry. Tato platforma je připevněna dvěma dlouhými šrouby, které zároveň spojují zadní ramena ke spodnímu platu. Senzor je také napájen napětím 5V a s řídicí jednotkou komunikuje přes UART protokol. Tedy všechny čtyři vodiče je potřeba vyvést po platformě a napájet je na řídicí jednotku na 5V napětí a UART6.



Obrázek 67 - Upevnění senzoru do 3D tištěné platformy

d) Připojení video vysílače

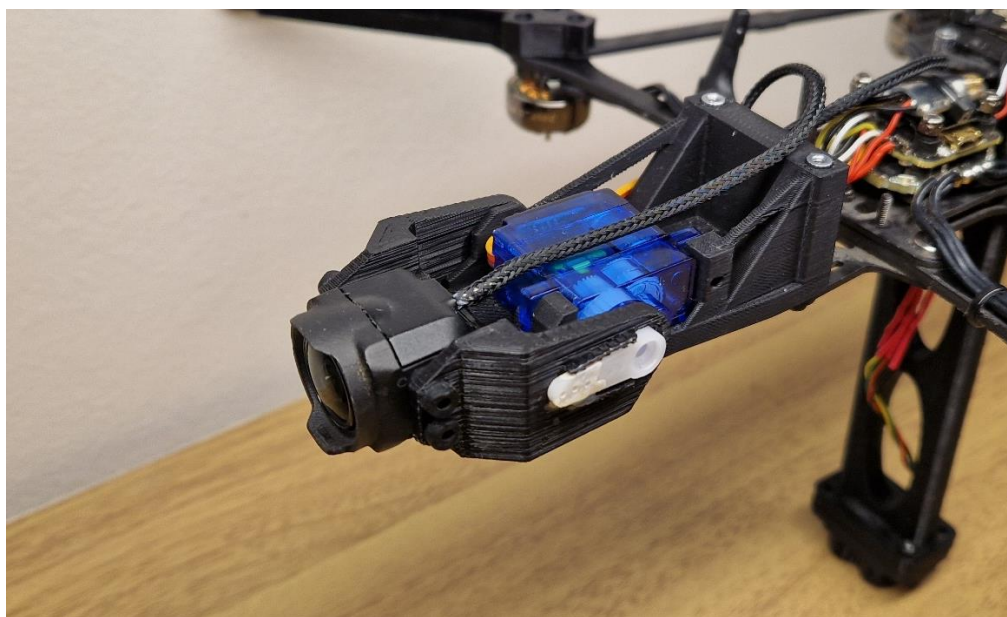
Video vysílač DJI O3 Air Unit je kompletní set kamery, video vysílače a antény. Elektronika je umístěna v hliníkovém těle, které slouží jako pasivní chladič a zároveň jako ochranné pouzdro před fyzickým poškozením. Celý set je vzhledem k rozměrům ostatní elektroniky neforemný a těžký, proto pro jeho umístění nezbývalo jiné místo než v zadním volném prostoru uvnitř rámu dronu. Orientaci video vysílače jsem zvolil tak, aby anténní výstupy směřovali do zadní části koptéry a kabeláž od modulu kamery směřovala do přední části. Protože video vysílač nemá žádné montážní otvory kompatibilní s montážními otvory v rámu, navrhl jsem jednoduchou redukci a montážní základnu pro její připevnění ke spodnímu platu rámu. Díky tomuto umístění je slot na MicroSD kartu, USB-C konektor a párovací tlačítko na video vysílači dobře přístupné. Video vysílač disponuje konektorem pro šesti pinový konektor od kabeláže do řídicí jednotky. Z tohoto šesti pinu bylo potřeba zapojit pouze červený (RED) napájecí vodič, ground (GND), UART3 RX a UART3 TX vodič. O3 Air Unit lze napájet napětím 7.4 až 26,4V s odběrem až 2A. Proto jsem se rozhodl Air Unit napojit přímo na VBAT neboli vstup bateriového napětí. Zbývající UART vodiče jsem napojil na UARTX na řídicí jednotce. Anténu jsem umístil do 3D tištěného TPU držáku, umístěného na zadních sloupcích rámu.



Obrázek 68 - Umístění O3 Air Unit do zádi koptéry

e) Montáž gimbalu kamery

Protože je potřeba modul kamery od video vysílače umístit do úrovně stěny ochranné klece, navrhl jsem 3D model prodlužující konstrukce, která zároveň slouží jako montážní platforma pro servo motor, který bude pohánět tilt gimbal, tedy kloub, který bude kameru naklápět v rozsahu 170° ve svislém směru. Servo motor bude napojen na volný výstup pro dodatečné motory nebo jiné PWM periferie, a to plošku M5. Napájen bude z volné 5V větve. Protože modul kamery má v sobě integrovaný citlivý gyroskop, který zaznamenává gyro data pro případnou stabilizaci, bylo zapotřebí modul kamery odizolovat od vibrací koptéry a konstrukce. Vymodeloval jsem tedy rameno gimbalu tak, aby do montážních otvorů bylo možné vložit antivibrační silikonové sloupky, které pohltí vysokofrekvenční vibrace. Pro umístění modulu kamery je potřeba vyměnit kabel od kamery, protože základní zhruba 12 cm dlouhý kabel nedosáhne až na rameno gimbalu a nedovolí dodatečné pohyby. Kabel jsem tedy vyměnil za 20 cm variantu. Kabel je protažen nad elektronikou a uložen volně, pro pohyby od náklonu gimbalu.



Obrázek 69 - Konstrukce gimbalu s osazenou FPV kamerou

f) Osvětlení

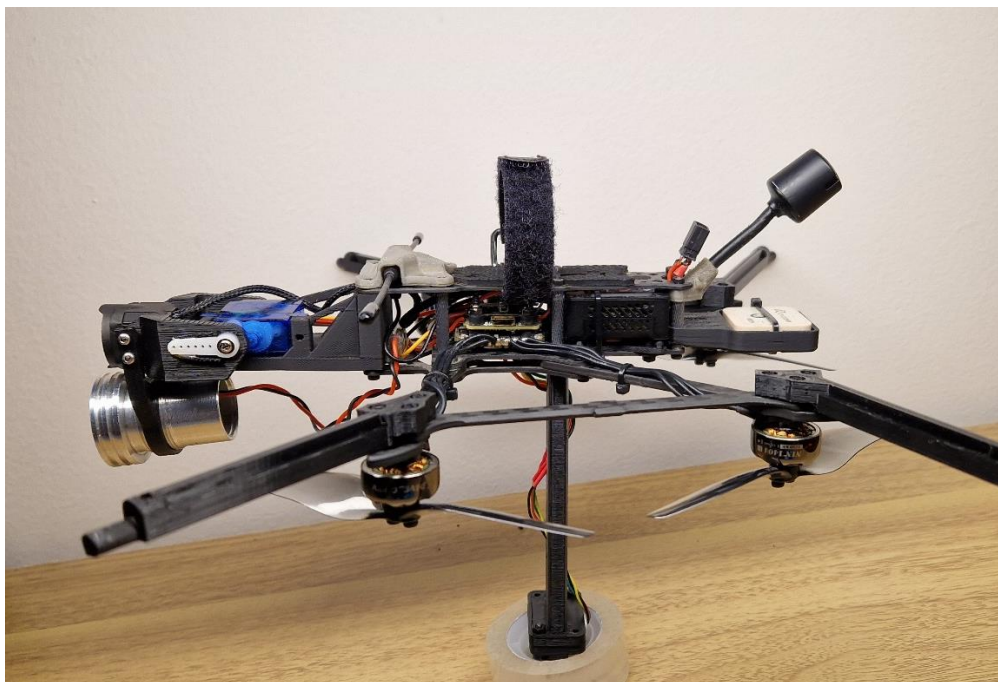
Pro osvětlení jsem se rozhodl použít 18 watové CREE LED čipy na 12V. Protože se jedná o velice výkonné čipy, bylo je potřeba osadit chladiči. Protože jsem chtěl tělo osvětlení navrhnout co nejkompaktnější a nejlehčí, rozhodl jsem se namísto velkého chladiče použít kovovou patici do outdoorové svítilny se závitem, který lze využít pro následnou montáž na koptéru. Protože by samotná patice nestačila k pasivnímu uchlazení LED čipu, rozhodl jsem se využít proud vzduchu vytvářený motory koptéry k aktivnímu chlazení. Do patice svítilny jsem dodal několik menších chladičů a následně jsem osvětlení umístil pod kameru dronu do úrovně vrtulí. Upevnění osvětlení jsem opět vyřešil 3D tiskem vlastního modelu. Pro napájení osvětlení jsem použil 12V regulátor napětí, napájený přímo z baterie.



Obrázek 70 - 18W osvětlení s chladičem

g) Kompletace rámu

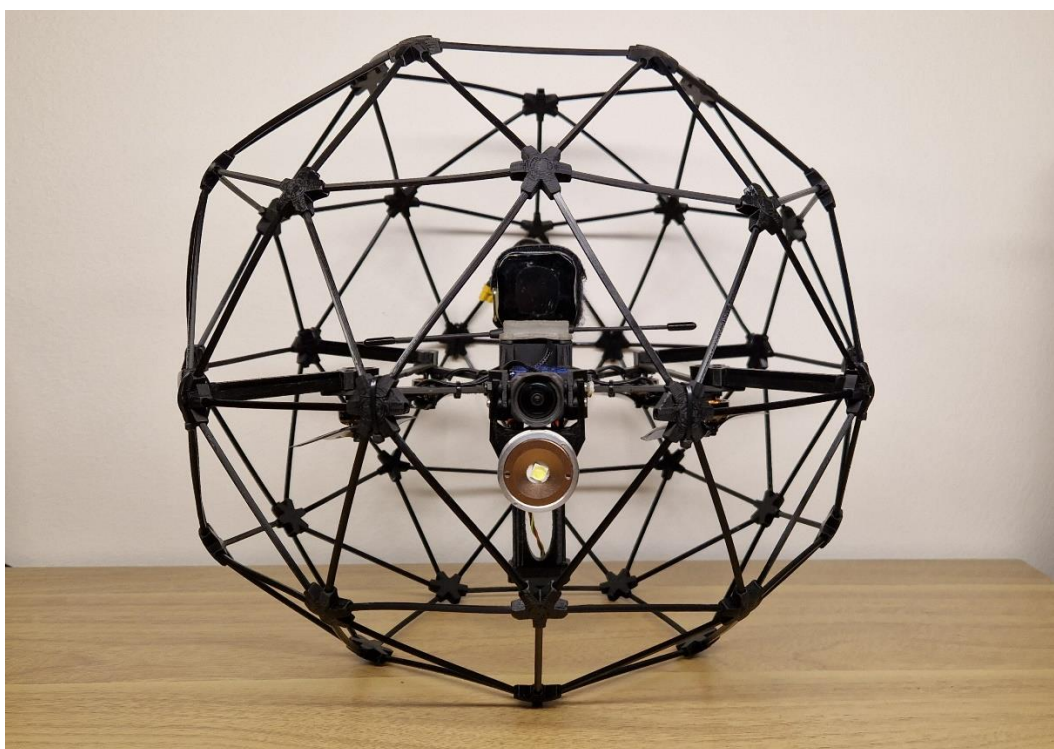
Nyní, když je všechna elektronika umístěna uvnitř rámu na svých pozicích a připájena, můžeme rám dokončit přimontováním horního plátu rámu. Horní plato je přišroubováno osmi imbusovými M2 šrouby do distančních sloupků. Na horní plato jsem připevnil protiskluzovou podložku pod baterii a bateriový pásek na suchý zip pro pevné upevnění pohonné baterie ke koptěře.



Obrázek 71 - Uzavřený kompletní rám koptéry

h) Ochranná klec

Ochrannou klec jsem zamýšlel vytvořit z oválných uhlíkových profilů spojených 3D tištěnými spoji. Pro prototypování jsem použil dřevěné špejle a následně 3D tištěné profily průměru 3 mm. Otestoval jsem několik typů spojů a konstrukcí, nejvhodnějším typem konstrukce se zdálo použití polygonové sítě, kde jsem se inspiroval projekty geodetických dómů. Vymodeloval jsem si tedy hexagonální a pentagonové spojky s otvory o průměru 3 mm pro nasunutí špejlí. Následně jsem si stanovil potřebný kruhový průměr pro svoji koptéru. Pro výpočet délek profilů jsem využil kalkulátor na stránce pro alternativní stavby: <https://simplydifferently.org/> Následně jsem si sestavil středový kruh a podle něj navrhl prodloužení ramen pro upevnění ochranné klece ke koptéře. Prodloužení ramen jsem navrhl tak, aby přenášela co nejméně vibrací do konstrukce tak, aby spoj ochranné klece s rameny absorboval případné nárazy, pomocí kluzného uložení. Následně jsem dokončil spodní i horní část ochranné klece.



Obrázek 72 – Kompletní ochranná klec

i) Baterie

Baterii pro inspekční koptéru jsem se rozhodl zkonstruovat sám, ze mnou zvolených článků, aby baterie splňovala výše zmíněné specifické požadavky. Baterie se bude skládat ze čtyř sériově zapojených Li-Ion článků US18650VTC6 od výrobce Sony. Tyto články mají kapacitu 3120mAh a dokáží poskytnout až 30A kontinuálního proudového zatížení.

Prvně je potřeba si články mechanicky spojit, to lze provést několika způsoby. Já jsem zvolil metodu jednoduchého slepení článků pomocí tavné pistole. Následně jsem pomocí bodovací svářečky a niklových pásků spojil jednotlivé články v sérii. Na krajní články jsem napájel silové vodiče s konektorem XT30, pro připojení s koptérou, a na jednotlivé póly článků jsem napájel vodiče od balančního konektoru, aby bylo baterii možno bezpečně nabíjet. Poté, co je pájení dokončeno, jsem zafixoval vodiče v jednom místě baterie, aby nedošlo k mechanickému poškození při manipulaci s vodiči a následnému zkratu. Posledním krokem je zatavení celé baterie do teplem smršťovací fólie, která články zafixuje a ochrání ji před mechanickým poškozením.



Obrázek 73 - 4S 3000mAh Li-Ion baterie

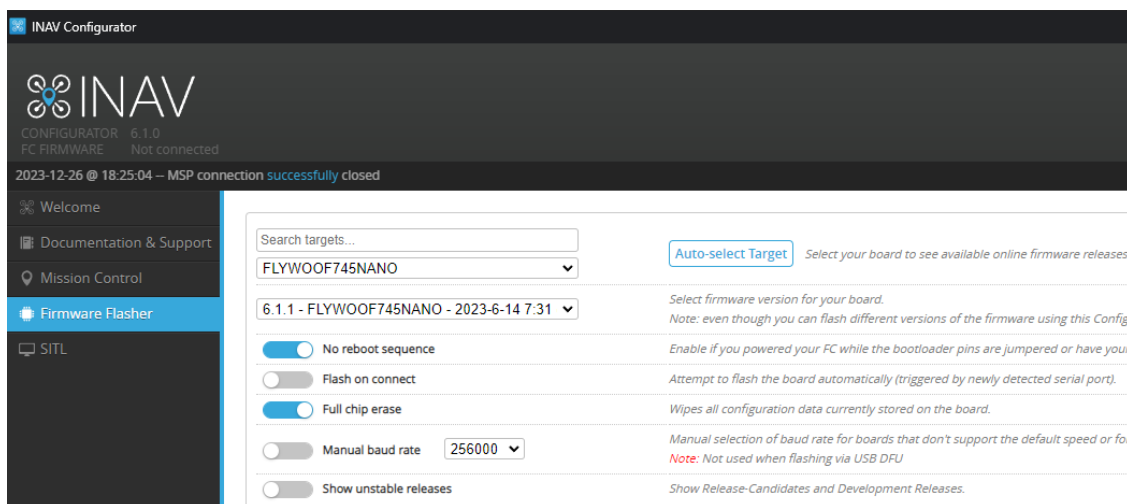
Nastavení koptéry – metodika

a) Nahrání softwaru do řídicí jednotky

Nyní když je všechna mechanická stavba hotova, je potřeba koptéru nastavit po softwarové stránce. Jak jsem již zmínil, zvolený software pro tuto koptéru bude INAV. INAV je firmware s otevřeným zdrojovým kódem a je neustále aktualizován a vylepšován komunitou vývojářů.

Firmware byl převážně zaměřen na navigaci a autonomní lety. Kromě koptér lze INAV použít také pro letadla s pevným křídlem a RC auta nebo lodě. INAV nabízí pokročilejší funkce GPS, jako je navigace pomocí navigačních bodů, návrat domů, udržování nadmořské výšky nebo držení pozic pomocí externích senzorů.

Do řídicí jednotky jsem nahrál pomocí INAV Configuratoru nejnovější verzi FW a to verzi 6.1.1, která byla v době psaní článků dostupná. INAV Configurator je oficiální nástroj pro nastavení a nahrávání INAV softwaru.



Obrázek 74 - Firmware Flasher

b) Nastavení portů a periférií

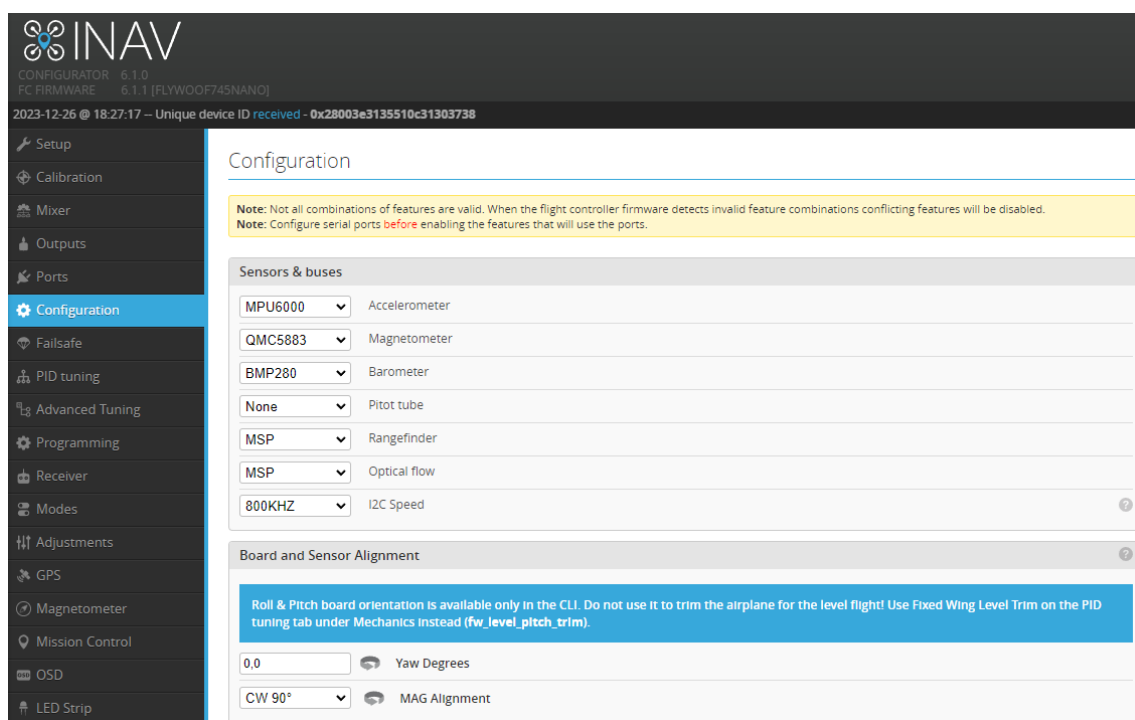
Po připojení do nově nahraného FW, jsem nejprve přiřadil periferie k UARTům, ke kterým byly připojeny, aby řídicí jednotka věděla, co se na daném UARTu nachází a jak s tím má pracovat. Tedy pro přijímač jsem aktivoval Serial RX protokol u UART1, řídicí jednotka s tímto UARTem bude počítat jako s přijímačem, který se dále podrobně nastaví ve vlastní záložce později. GPS jsem aktivoval pro UART2 a v záložce jsem vybral senzor typu GPS, LiDAR s Optical Flow senzorem jsem aktivoval pro UART6, kde jsem aktivoval komunikační MSP protokol. Zbývá nastavit komunikaci s video vysílačem, INAV je již připraven pro komunikaci s DJI O3 Air Unit přes MSP DisplayPort, takže stačí tento protokol aktivovat v záložce periférií u UART3.

Identifier	Data	Telemetry	RX	Sensors	Peripherals
USB VCP	<input checked="" type="checkbox"/> MSP 115200	Disabled AUTO	<input type="checkbox"/> Serial RX	Disabled 115200	Disabled 115200
UART1	<input type="checkbox"/> MSP 115200	Disabled AUTO	<input checked="" type="checkbox"/> Serial RX	Disabled 115200	Disabled 115200
UART2	<input type="checkbox"/> MSP 115200	Disabled AUTO	<input type="checkbox"/> Serial RX	GPS 115200	Disabled 115200
UART3	<input type="checkbox"/> MSP 115200	Disabled AUTO	<input type="checkbox"/> Serial RX	Disabled 115200	MSP DisplayPort 115200
UART4	<input type="checkbox"/> MSP 115200	Disabled AUTO	<input type="checkbox"/> Serial RX	Disabled 115200	Disabled 115200
UART5	<input type="checkbox"/> MSP 115200	Disabled AUTO	<input type="checkbox"/> Serial RX	Disabled 115200	Disabled 115200
UART6	<input checked="" type="checkbox"/> MSP 115200	Disabled AUTO	<input type="checkbox"/> Serial RX	Disabled 115200	Disabled 115200
UART7	<input type="checkbox"/> MSP 115200	Disabled AUTO	<input type="checkbox"/> Serial RX	Disabled 115200	Disabled 115200

Obrázek 75 - Záložka Ports

c) Konfigurace senzorů

Po přiřazení jednotlivých periférií je potřeba nastavit, o jaké konkrétní typy senzorů se jedná, aby s nimi řídicí jednotka mohla pracovat. Nastavil jsem tedy senzory podle toho, jaké se na řídicí jednotce nebo k ní připojené nachází. Akcelerometr a gyroskop byl nastaven jako MPU6000, magnetometr neboli kompas, který se nachází na GNSS modulu byl nastaven jako QMC5883 a nastavil jsem rychlost komunikace s kompasem na 800kHz, LiDAR s Optical Flow senzorem jako komunikace skrze MSP protokol.



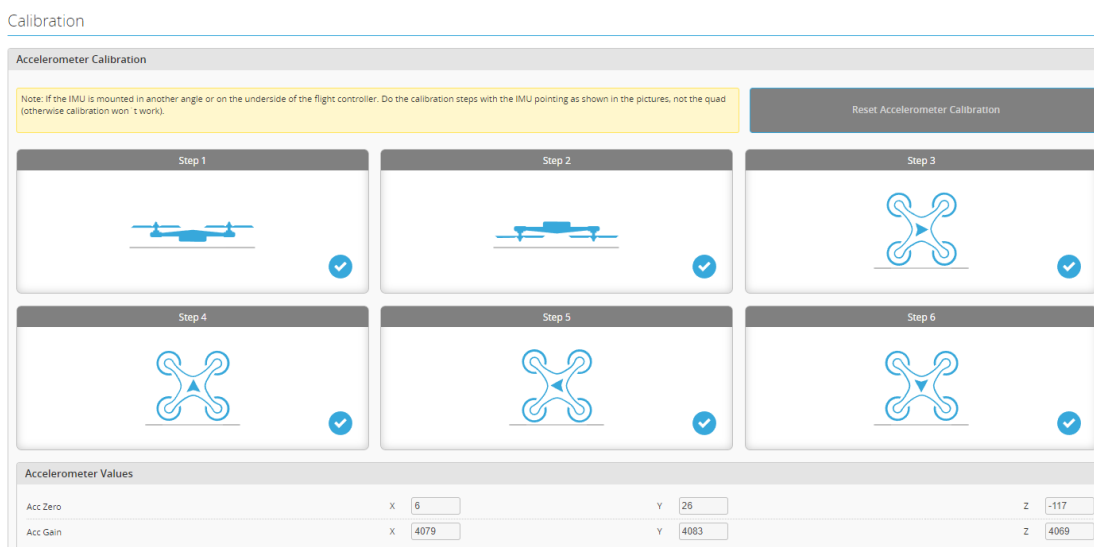
Obrázek 76 - Záložka Configuration

Dále bylo potřeba zkontrolovat hodnotu pro orientaci řídicí jednotky, aby FW věděl, kde se nachází předek koptéry. Většina řídicích jednotek má směr gyroskopu v základu vyznačenou šipkou přímo na obvodu mezi komponenty. V našem případě se směr šipky shoduje se směrem koptéry.

Protože se na koptěře nachází kompas, je potřeba zkontrolovat také jeho orientaci, aby v základu znal směr koptéry, vzhledem k magnetickému poli země. Dle datasheetu k GNSS modulu jsem zjistil, že při mém umístění je kompas otočen o 90° po směru hodinových ručiček, proto jsem hodnotu MAG Alignment změnil na CW90°, čímž jsem řídicí jednotce dodal data o tom, jak je skutečně kompas orientovaný.

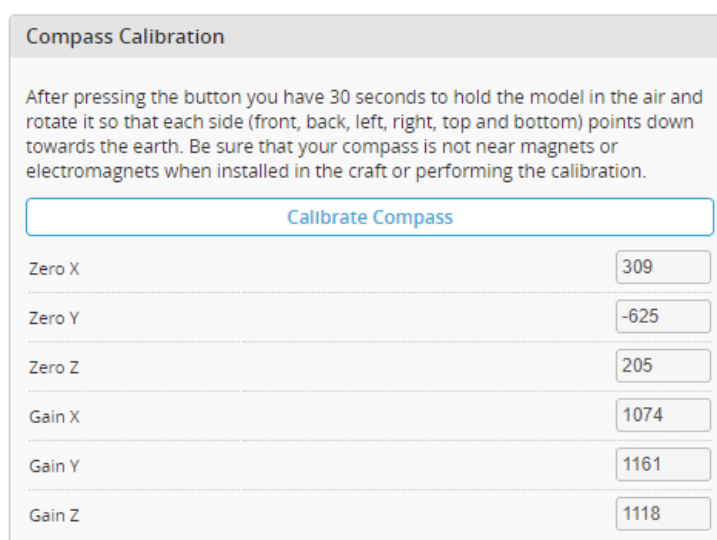
d) Kalibrace akcelerometru a kompasu

Nyní, když řídící jednotka zná orientaci koptéry, jsem provedl kalibraci akcelerometru, aby si řídící jednotka ujasnila, jak je v prostoru otočena a kde je vodorovná rovina, kterou je důležité znát pro stabilizované režimy letu. Tato kalibrace se provádí pomocí uživatelského postupu, kdy se spustí kalibrace a je potřeba koptéru umístit do šesti různých poloh, díky kterým si řídící jednotka spolehlivě určí odchylky.



Obrázek 77 - Záložka Calibration

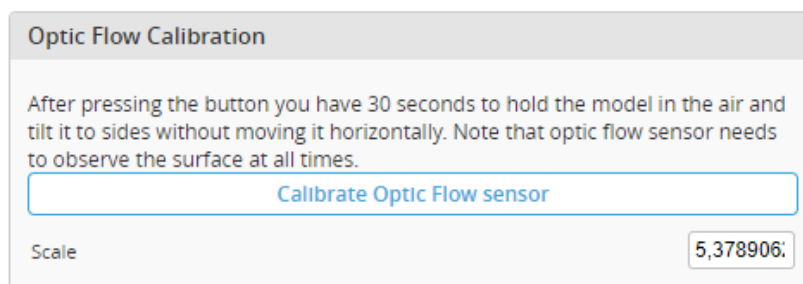
Po kalibraci akcelerometru je ještě potřeba zkalibrovat magnetometr, to se provádí podobně jako kalibrace akcelerometru, jen je potřeba po spuštění kalibrační sekvence koptéru otočit alespoň o 360° ve všech třech osách. Tato kalibrace musí probíhat v prostředí bez magnetického rušení a daleko od kovových nebo magnetických předmětů.



Obrázek 78 - Kalibrace kompasu

e) Kalibrace Optical Flow senzoru

Protože každý senzor je z výroby nastaven do základních hodnot, je potřeba zkalibrovat i Optical Flow senzor pro naše použití, to znamená, že náš Optical Flow senzor bude snímat zem, respektive povrch pod koptérou pod úhlem 0° až 20° při maximálním náklonu koptéry při letu. Pro tyto situace je potřeba ho zkalibrovat. Kalibrace probíhá tak, že během časového intervalu je potřeba ve fixní výšce senzor naklápět právě v rozmezí 0° až 25° do všech směrů nad strukturovaným povrchem.



Optic Flow Calibration

After pressing the button you have 30 seconds to hold the model in the air and tilt it to sides without moving it horizontally. Note that optic flow sensor needs to observe the surface at all times.

[Calibrate Optic Flow sensor](#)

Scale

Obrázek 79 - Kalibrace Optical Flow senzoru

f) Nastavení GNSS modulu

Před nastavením samotného GNSS modulu je potřeba v záložce GPS s nastavením aktivovat funkci GPS for navigation and telemetry. Tato funkce nám dovolí podrobně nastavit GNSS modul. Nyní je potřeba vybrat správný komunikační protokol, se kterým je modul kompatibilní. V našem případě je to protokol UBLOX. Následně můžeme, ale nemusíme, zvolit ručně Ground Assistance Type na European EGNOS, čímž vlastně koptéru připravíme na to, že se nachází na území Evropy a měla by dávat větší váhu evropským satelitům od těch sousedních. Navíc informace poskytované systémem EGNOS zlepšují přesnost a spolehlivost informací o poloze GNSS. Kromě toho EGNOS také vysílá přesný časový signál pro Evropu.

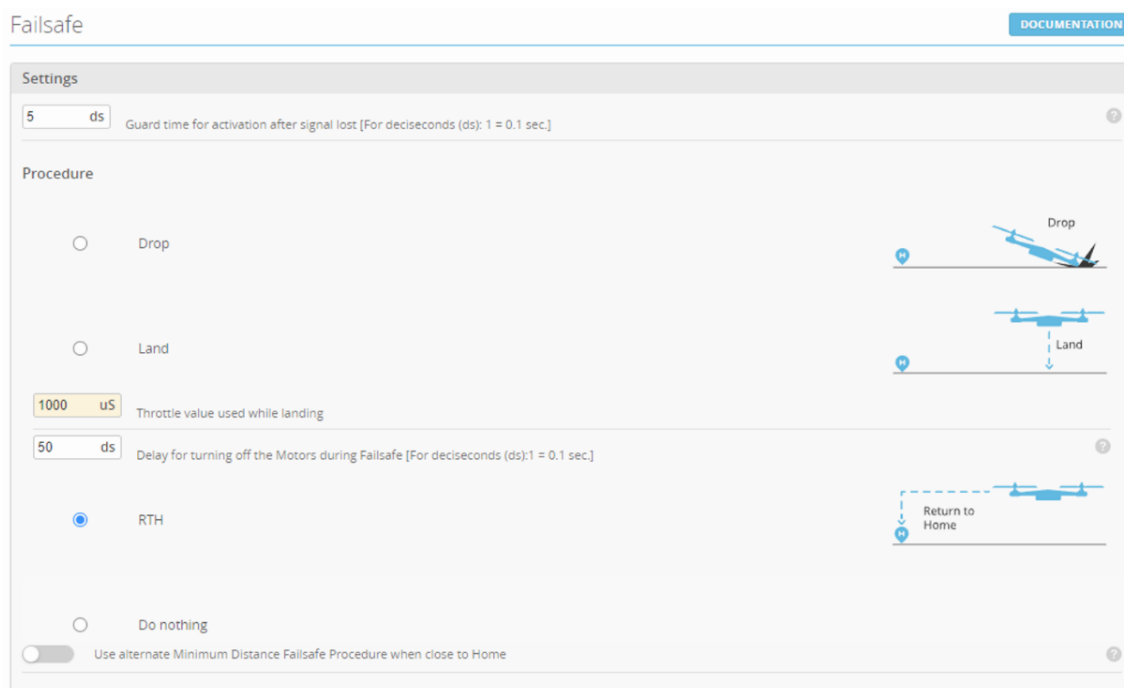
GPS

Configuration	
Note: Remember to configure a Serial Port (via Ports tab) when using GPS feature.	
<input checked="" type="checkbox"/>	GPS for navigation and telemetry ?
UBLOX	Protocol
European EGT	Ground Assistance Type
<input checked="" type="checkbox"/>	Gps use Galileo Satellites
01:00 hh:mm	Timezone Offset ?
EU	Automatic Daylight Savings Time ?

Obrázek 80 - Záložka GPS

Následně v nastavení Failsafe nastavíme, jak se má koptéra zachovat v případě ztráty RC signálu. V našem zájmu je nastavit Failsafe sekvenci tak, aby při signálu GPS se koptéra autonomně vrátila k místu startu, a aby mimo GPS signál započala přistávací sekvenci.

Proto nastavíme Failsafe typ na RTH, což je zkratka pro termín „Return To Home“ vrátit se domů. Podrobné nastavení RTH nalezneme v záložce Advanced Tuning, kde nastavíme výšku pro sekvenci návratu, rychlost pohybu, stoupání a klesání, dle potřeby a typu mise.

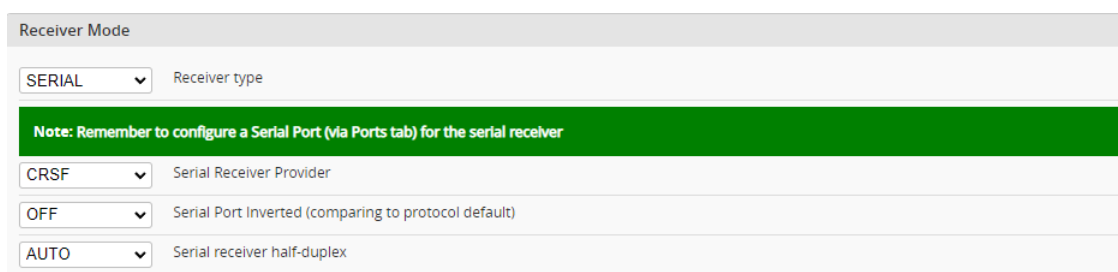


Obrázek 81 - Záložka Failsafe

g) Nastavení RC přijímače a vysílače

Nyní si nastavíme RC komunikaci vysílačky a přijímače. Díky zvolenému systému Crossfire je párování přijímače s vysílačem velmi jednoduché. Crossfire Nano RX, jakožto nově rozbalený kus, je po přivedení napájení připraven v párovacím režimu. Nyní stačí spustit párovací frekvenci na vysílači, který přijímač rozpozná, zjistí jeho verzi, případně ho bezdrátově aktualizuje a následně se s ním spáruje.

Po spárování se vrátíme do INAV Configuratoru, kde v nastavení Receiver vybereme typ přijímače jako SERIAL, tedy že je připojen přes UART a protokol vybereme CRSF. CRSF je protokol vyvinutý firmou TBS pro jejich RC systém Crossfire. Důkazem, že se jedná o inovativní protokol je skutečnost, že protokol CRSF si vybírají jako hlavní komunikační protokol i jiné moderní RC systémy, například ExpressLRS.



Receiver Mode

SERIAL Receiver type

Note: Remember to configure a Serial Port (via Ports tab) for the serial receiver

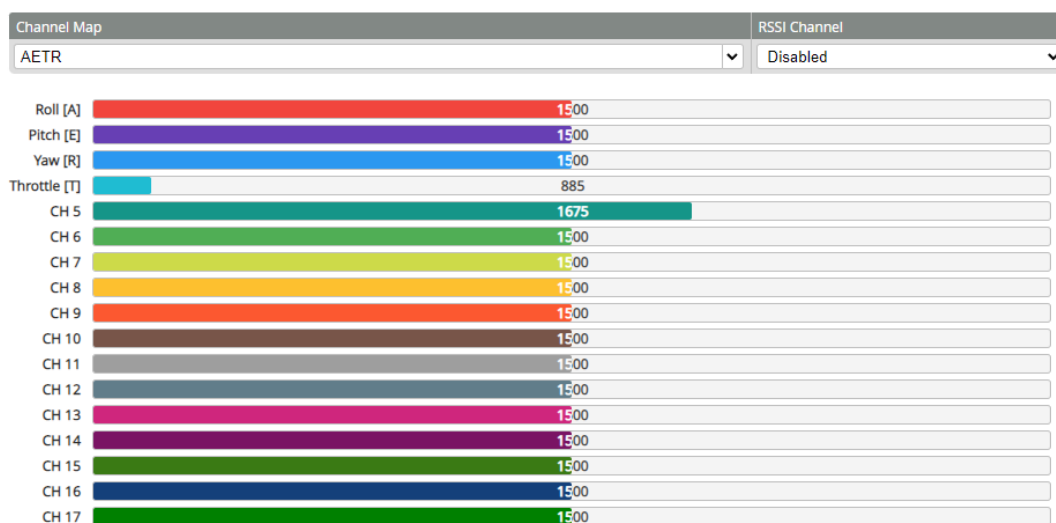
CRSF Serial Receiver Provider

OFF Serial Port Inverted (comparing to protocol default)

AUTO Serial receiver half-duplex

Obrázek 82 - Záložka Receiver

Po dokončení tohoto nastavení, lze v nastavení Receiver ve vizualizace kanálů pozorovat pohyby páček a přepínačů, což nám indikuje správně fungující RC systém pro naši koptéru. Můžete si všimnout, že kanály 1-4 jsou vyhrazeny pohybům gimbalů a kanály 5-12 pro přepínače.



Obrázek 83 - Channel Map

h) Přiřazení modes a funkcí RC vstupům

Když máme nastavený RC systém, můžeme si k jednotlivým přepínačům přiřadit funkce, které od koptéry budeme vyžadovat. To provedeme v nastavení Modes. Zde si dle vlastních preferencí přiřadím pomocí přehledného uživatelského rozhraní, co který přepínač v určité poloze má iniciovat. Jako příklad uvedu například položku ARM, což je spuštění motorů. K této funkci si přiřadím kanál 5, který je přiřazen ke dvou pozičnímu přepínači na vysílače, který mám po celou dobu letu pohotovostně v dosahu ukazováčku mé levé ruky. Posuvníkem rozsahu si určím, v jaké pozici přepínače je ARM aktivní a po uložení je funkce nastavena.

Takto provedu nastavení i dalších funkcí jako POSHOLD, ALTHOLD, HEADING HOLD a SURFACE pro nastavení funkce držení polohy. Nebo režim TURTLE, který dokáže po havárii softwarově otočit směr otáčení motorů pro případné otočení koptéry. INAV nabízí mnoho dalších funkcí, které už jsou na uživateli, zda je bude či nebude vyžadovat.

Modes DOCUMENTATION

Use ranges to define the switches on your transmitter and corresponding mode assignments. A receiver channel that gives a reading between a range min/max will activate the mode. Remember to save your settings using the Save button.

Hide unused modes

Arming

ARM CH 5 Min: 1700 Max: 2100

PREARM

Flight Modes

ANGLE CH 5 Min: 1700 Max: 2100

HORIZON

Navigation Modes

NAV POSHOLD CH 9 Min: 1700 Max: 2100

NAV RTH CH 8 Min: 1700 Max: 2100

NAV WP

GCS NAV

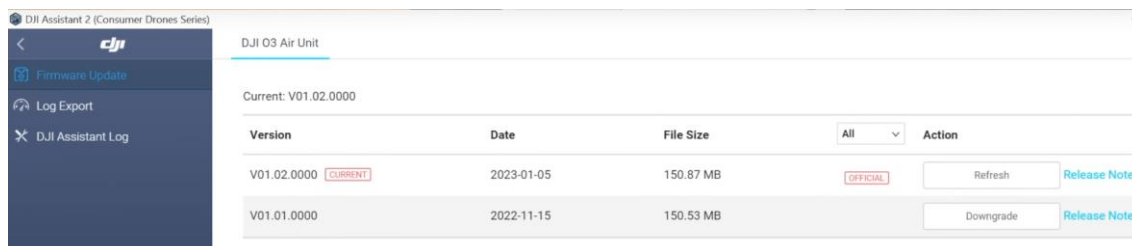
Flight Mode Modifiers

NAV ALTHOLD CH 9 Min: 1225 Max: 2100

Obrázek 84 - Záložka Modes

i) Spárování video vysílače a nastavení OSD elementů

Nastavení a spárování video systému je velmi jednoduché, protože DJI cílí na amatérské uživatele. Vytvořilo tak DJI program pro aktivaci a aktualizaci video vysílačů i brýlí. Program se nazývá DJI Assistant 2 (Consumer Drones Series), který lze stáhnout ze stránek DJI. Následně stačí program spustit, připojit USB-C kabelem Air Unit a brýle, ty aktivovat a aktualizovat.



Obrázek 85 - DJI Assistant 2 s připojenou O3 Air Unit

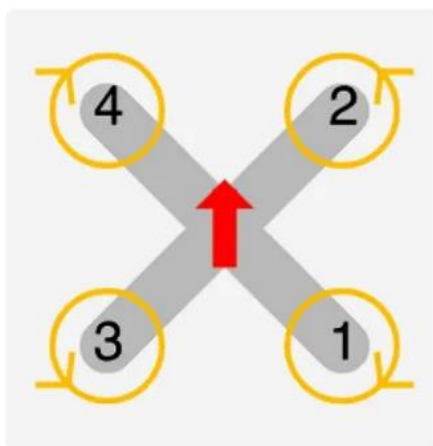
Po aktualizaci stačí brýle a video vysílač spárovat. To se provede pomocí tlačítka na brýlích a video vysílači. Poté je systém připraven a stačí už jen v INAV konfigurátoru nastavit a rozmístit OSD elementy. OSD je zkratka pro (on-screen display), jsou to jednoduše informační elementy promítané přes video přijímané do brýlí. Pilot si tak do obrazu přidá důležité informace, jako napětí baterie, stav signálu, počet satelitů, horizont, časovač a jiné. Tyto elementy si lze pomocí INAV konfigurátoru v nastavení OSD přizpůsobit dle potřeby.



Obrázek 86 - Rozvržení OSD elementů

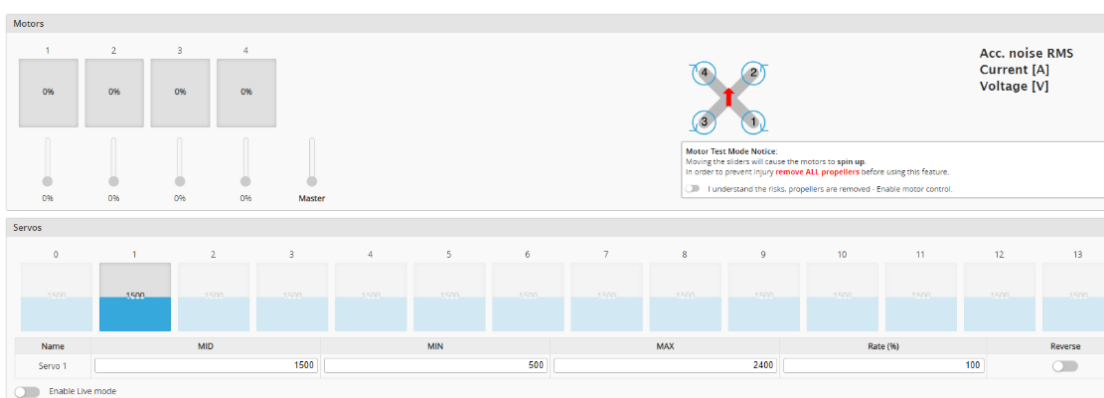
j) Nastavení motorů a serv

Nyní je potřeba v nastavení Mixer informovat řídicí jednotku o tom, že stroj je typu Multirotor ve tvaru Quad X, tedy motory umístěny na ramenech ve tvaru X a potvrdit, že se motory budou otáčet takzvaně props in, dle vizualizace. Props in znamená, že přední levý motor a pravý zadní motor se otáčí po směru hodinových otáček, a zbylé motory protisměru hodinových ručiček. Je nezbytné, aby tato vizualizace odpovídala skutečnosti, jinak koptéra není schopna letu.



Obrázek 87 - Schéma motorů

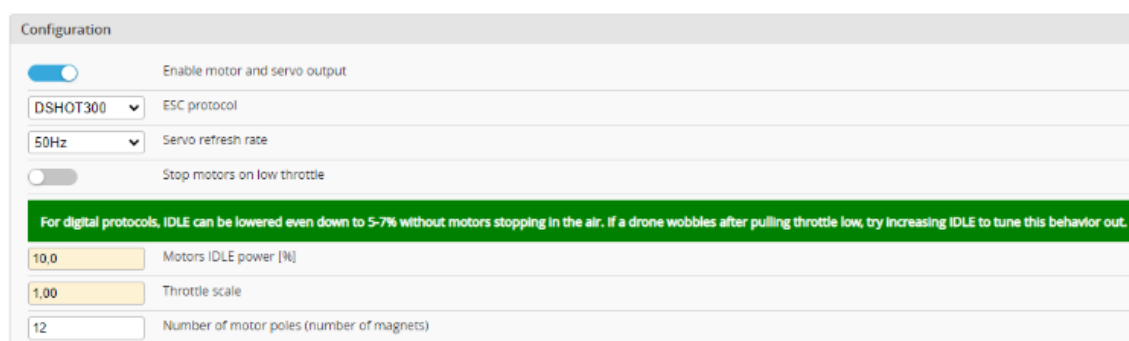
Ještě je potřeba přiřadit Servo č.1 k motor output č.5, v našem případě servo motor ovládající gimbal kamery. K tomuto gimbalu také přiřadím Input, tedy spouštěč, který toto servo bude ovládat. Zvolil jsem RC Channel 8, který jsme si na vysílačce přiřadili k potenciometru, který mi dovolí se servo motorem pohybovat plynule a volit si libovolné náklony podle potřeby.



Obrázek 88 - Přiřazení serva

Po přiřazení outputů v Mixéru je potřeba se přesunout do podrobného nastavení Outputs. Zde se aktivuje motor a servo output a nastaví se ESC protokol. ESC protokol je protokol komunikace řídicí jednotky s regulátorem otáček motorů. Náš regulátor podporuje protokol DSHOT, vybírám tedy DSHOT600, což je nejrychleji komunikující dostupná možnost tohoto regulátoru. Následně je potřeba v záložce Servos nastavit Servo 1, přesněji nastavit jeho rozsah. Nyní je potřeba zapojit napájení koptéry, abychom byly schopni se servy pohybovat a zjistit jejich skutečnou polohu vzhledem k příkazu v řídicí jednotce. Pro nás jsou důležité tři polohy gimbalu, pohled kolmo vzhůru, vodorovný pohled a pohled kolmo dolů. V hodnotách MID, MIN a MAX hledám takové hodnoty, aby gimbal byl v polohách, které potřebujeme. Následně nastavení uloží.

Outputs



Configuration	
<input checked="" type="checkbox"/>	Enable motor and servo output
DSHOT300	ESC protocol
50Hz	Servo refresh rate
<input type="checkbox"/>	Stop motors on low throttle
For digital protocols, IDLE can be lowered even down to 5-7% without motors stopping in the air. If a drone wobbles after pulling throttle low, try increasing IDLE to tune this behavior out.	
10,0	Motors IDLE power [%]
1,00	Throttle scale
12	Number of motor poles (number of magnets)

Obrázek 89 - Nastavení protokolu regulátoru a serv

Nyní můžeme aktivovat Motor Test Mode a roztočit všechny nebo jednotlivé motory, abychom zjistili, zda jsou na správných pozicích, a že se otáčejí dle vizualizace. V případě, že by se některý motor nacházel v rozporu s vizualizací, lze motory v nastavení Mixer přemapovat. Když by se některý motor otáčel opačným směrem, lze to vyřešit tak, že se vymění libovolné dva vodiče z trojice vodičů od motoru k regulátoru, nebo lze pomocí ESC konfiguratoru přehrát nastavení regulátoru, aby motor roztáčel opačným směrem.

6. Experimentální ověření funkčnosti navrženého dronu

Když je koptéra sestavena, nastavena a spárována, je potřeba ji otestovat, takzvaně zalétnout. Cílem zalétnutí je zjistit, zda je koptéra letuschopná, objevit případné nedostatky, ověřit vhodně rozvržené ovládací prvky, rozmístění OSD telemetrických dat a samotnou funkčnost jednotlivých subsystémů.



Obrázek 90 – Koptéra s vybavením připravená k letu

Pro první testovací let jsem zvolil širou louku s nízkou trávou. Cílem prvního letu bylo ověření, že je stroj vůbec letuschopný a případně ověřit funkčnost GNSS navigačního systému, funkce RTH, režimy POSHOLD a ALTHOLD. Zároveň jsem si během testovacího letu zvyknul na ovládání takového typu stroje. Testovací let proběhl úspěšně, při teplotě okolo 5°C a větru o rychlosti 10-16 km/h. Vítr byl slabý, avšak lehce ovlivnil stabilitu koptéry. V první fázi letu byla ověřena stabilita letu a následně proběhl test ALTHOLD, tedy držení konstantní výšky pomocí LiDARu. Poté, co byla potvrzena funkčnost ALTHOLD, provedl jsem test režimu POSHOLD, který mimo výšky drží i polohu v prostoru. Když jsem si potvrdil základní funkce, odletěl jsem s koptérou do vzdálenosti 100-150 metrů a otestoval funkci RTH, tedy nouzový návrat domů. Koptéra dle očekávání vystoupala do nejvyšší dosažené výšky během letu a následně započala návrat k místu vzletu. Po přiblížení k místu vzletu jsem převzal ovládání. Během letu jsem také vyzkoušel naklápění gimbálu kamery. Přestože byla teplota prostředí nižší a let ovlivňoval vítr, bylo dosaženo 13 minut letového času, při použití naší čtyř článkové Li-Ion baterie o kapacitě 3100 mAh.

Tento test potvrdil funkčnost základních funkcí a letuschopnost koptéry.



Obrázek 91 – FPV záznam z koptéry v exteriéru

Pro druhý testovací let jsem si zvolil opuštěnou polní cestu, cílem tohoto letu bylo otestovat maximální dosah video signálu, RC signálu a jejich kvalitu během letu. Protože jsou tyto lety uskutečněny mimo vizuální dohled pilota, během všech testů je koptéra vizuálně kontrolována spotterem, který je schopný kdykoliv koptéru deaktivovat. Testovací let proběhl při teplotě okolo 5 °C a větru 7-12 km/h ve výšce 50 metrů nad zemí. Byly použity základní lineární antény dodávané k DJI Goggles 2 a základní dual band antény k DJI O3 Air Unit. Při testu bylo dosaženo vzdálenosti 3 km, při této vzdálenosti došlo k prvnímu většímu výkyvu datového toku video signálu, a to k poklesu z 50Mb/s na 15Mb/s. Současně došlo ke snížení kvality signálu na 50%. Celá vzdálenost byla téměř bez překážek, které by ovlivnili kvalitu signálu. Protože jsem po celou dobu letu od sebe měl vítr v zádech a baterie byla v tu chvíli vybita přesně o 1/3 své kapacity, usoudil jsem, že pro náš test je tato vzdálenost dostačující a započal jsem návrat. Návrat trval kvůli protivětru téměř dvakrát déle, než cesta do vzdálenosti 3 km, zároveň bylo spotřebováno daleko více energie, a tak jsem přistával s naprosto vybitou baterií. Celá zalétnutá vzdálenost trvala 10 minut 53 vteřin a bylo spotřebováno 2800mAh.



Obrázek 92 - Trasa letu s telemetrickými daty ve vzdálenosti tří kilometrů

Tento test nám tedy udává maximální komfortní dosah koptéry bez překážek ve spojnici mezi koptérou a pilotem na 3 km při ideálních podmínkách, v bezvětří a při teplotách vyšších než 5°C.

Ve třetím testovacím letu jsem se rozhodl ověřit schopnost koptéry letu ve stísněných prostorech a otestovat funkčnost ochranné klece. Pro tento test jsem si vybral prostory skladu internetové obchodu, kde jsou stísněné prostory simulovány regály, které vytváří úzké prostory. Tento test jsem tedy provedl pouze v interiéru, bez vnějších povětrnostních vlivů, při teplotě okolo 19° a při osvětlení ze stropních svítidel. Během letu jsem se také zaměřil na konstrukci sloupu a trámu, kterou jsem si pomocí kamery v dronu natočil ze všech stran a pomocí naklápění gimbalu i z několika úhlů. Tyto záběry jsem následně použil pro vytvoření 3D modelu pomocí fotogrammetrie.



Obrázek 93 - FPV záznam z koptéry v interiéru

Během letu se několikrát potvrdila funkčnost ochranné klece, díky které se koptéra dokázala dostat i skrze otvory o rozměru 40x40cm. Také se potvrdila použitelnost nahraných záběrů, které byly za použití programu ReCap Photo přetvořeny do 3D modelu. Během interiérového letu bylo dosaženo 16 minut letového času.



Obrázek 94 - Ukázka 3D modelu konstrukce

Čtvrtý testovací let jsem provedl ve stejných prostorech skladu jako ve třetím testu, ale za úplné tmy, abych ověřil funkčnost dodatečného osvětlení koptéry. Během letu jsem opět provedl skenování stejné konstrukce sloupu a trámu.



Obrázek 95 – Prostup stísněnými prostory za tmy

Během testu se potvrdila použitelnost nahrávaných záběrů, které byly za použití programu ReCap Photo přetvořeny do 3D modelu.



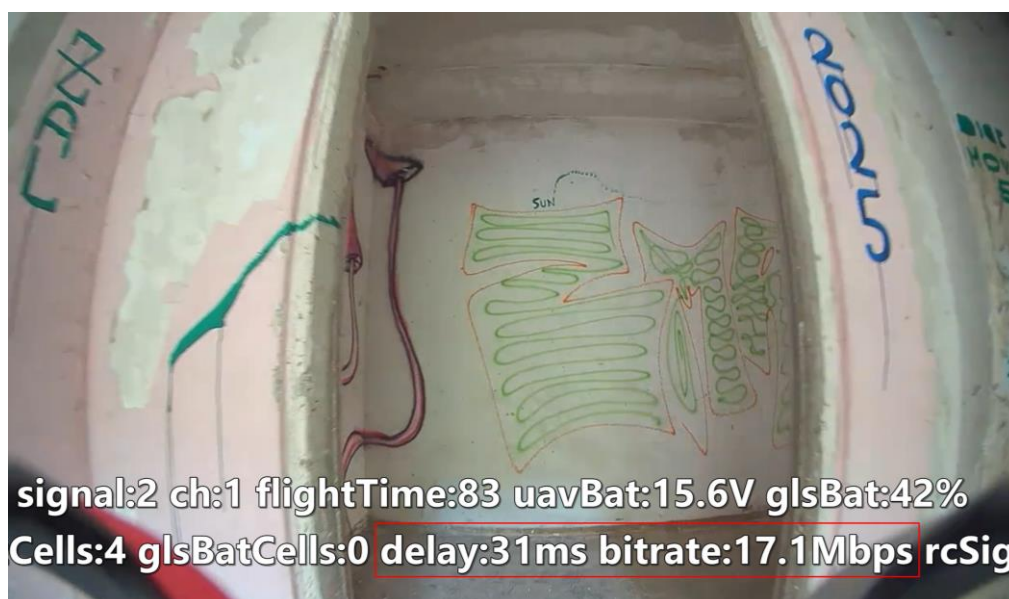
Obrázek 96 - Ukázka 3D modelu konstrukce osvětlené za tmy

Pátý test jsem provedl v prostorech opuštěných bytových domů ze železobetonu, kde jsem ověřil schopnost penetrace RC a video signálu skrze materiál. Železobetonovou konstrukci jsem vybral proto, protože se jedná o materiál odolný prostupu signálu. Objekt má obdélníkový půdorys 70x20 metrů, a tak jsem svojí pozici umístil 10 metrů od kratší stěny objektu, aby mezi mnou a koptérou bylo co nejvíce materiálu. Proletěl jsem objektem ke středovému schodišti, po schodišti vyletěl do třetího patra a následně zamířil do nejvzdálenější místnosti.



Obrázek 97 - Půdorys testovacího objektu

Během celého letu nedošlo k silnějšímu narušení stability signálu. Při otočení kolem osy v nejvzdálenější místnosti došlo k poklesu síly signálu videa na 50% a poklesu datového toku z 50Mb/s na 17Mb/s. Síla RC signálu se pohybovala stále nad 90%, jen se RC vysílač přepnul z 250mW na 500mW vysílacího výkonu.



Obrázek 98 - FPV záznam v nejvzdálenějším místě objektu

Šestý neplánovaný testovací let proběhl v prostorech opuštěné chmelárny, kdy jinému pilotovi uvízla freestylová koptéra ve zříceném patře chmelárny. Inspekční koptéra byla využita pro lokalizaci ztracené koptéry a následně pro vyhledání cesty, kudy se lze ke koptěře dostat. Díky tomu bylo možné se seznámit s prostorem zříceného patra ještě před příjezdem montážní plošiny.



Obrázek 99 - Uvězněná koptéra pod trámy zříceného krovu chmelárny

Díky inspekční koptěře bylo možné vyhodnotit, kde přistavit montážní plošinu a kudy se ke ztracené koptěře dostat. Protože v patře se ztracenou koptérou byl nedostatek světla, osvětlení inspekční koptéry velmi pomohlo při hledání. Celá záchranná akce následně proběhla úspěšně.



Obrázek 100 - Hledání vhodné přístupové trasy

7. Diskuse výsledků

Nyní po sběru dat lze provést výsledné zhodnocení. Inspekční koptéra splňuje všechny požadavky, které byly předem stanoveny. Díky provedení testovacích letů, lze koptěře přiřadit i ověřené parametry, které lze porovnat s parametry komerčně vyráběné koptéry se stejným zaměřením. Jako stroj k porovnání parametrů jsem vybral koptéru Elios 3 od firmy Flyability, která byla zmíněna už v předešlé části této práce. Do pořizovací ceny koptéry je zahrnuto i nezbytné příslušenství k provozu koptéry.

Parametr	Elios 3	Autorova inspekční koptéra
Vnější rozměr	480 x 380 mm	340 x 300 mm
Vzletová hmotnost	1900 gramů	600 gramů
Úroveň hluku	120 dB(A) max @ 1m	88 dB(A) max @ 1m
Provozní teplota	0°C až 50°C	0°C až 50°C
Doba letu (indoor)	12,5 minut	16 minut
Doba letu (outdoor)	-	13 minut
Letové senzory	IMU, magnetometr, barometr, 3 optické senzory, 1 sensor vzdálenosti	IMU, magnetometr, barometr, 1 optický senzor, 1 sensor vzdálenosti, GNSS modul
Letové režimy	OPTI - Assist Mode ATTI - Attitude mode SPORT - Sport mode	POSHOLD - Assist Mode ALTHOLD - Attitude mode ANGLE - Sport mode
Fail Safe	Land	Land - INDOOR Return To Home - OUTDOOR
Maximální rychlost	7 m/s	14 m/s
Max. odolnost proti větru	7 m/s	10 m/s
Dosah RC systému	0,5 km bez překážek	20 km bez překážek
Frekvence RC systému	2.4GHz (2400MHz – 2483MHz) ≤20 dBm	868Mhz (860MHz - 885Mhz) ≤33dBm
Dosah video přenosu	0,5 km	10 km
Frekvence video systému	5.725-5.850 GHz ≤13 dBm	5.725-5.850 GHz ≤33 dBm
Datový tok video přenosu	18 Mbps	50 Mbps
Rozlišení video přenosu	1080p/30fps	1080p/100/60fps - Latence až 30 ms
Senzor RGB kamery	1/2.3" CMOS	1/1.7" CMOS
Maximální rozlišení nahrávání	3840 x 2160 30fps Effective Pixels: 12.3 M	3840 x 2160 až 120fps Effective Pixels: 48 MP
Datový tok nahrávání	-	150 Mbps
Zorný úhel nahrávání	130°	155°
Senzor Termokamery	Lepton 3.5 FLIR	-
Rozlišení Termokamery	160 x 120 při 9 fps	-
Zorný úhel Termokamery	56° x 42°	-
Pořizovací cena kompletního setu:	1 000 000 Kč vč. DPH	45 000 Kč vč. DPH

Tabulka 1 – Porovnání parametrů komerční a autorem sestavené koptéry

8. Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo navrhnout a sestavit konkurenci schopnou koptéru pro inspekční účely do stísněných prostor. Tento cíl se mi podařilo splnit ve všech stanovených parametrech. V rámci práce navržená, vyrobená a následně testovaná koptéra je schopna zaznamenávat snímky ve vysokém rozlišení i za zhoršených světelných podmínek, které lze využít pro kontrolu konstrukcí, nebo je lze využít k vytvoření 3D modelu. Zároveň je inspekční koptéra vybavena asistenčními a bezpečnostními systémy, které zjednodušují ovládání koptéry i méně zkušeným pilotům nebo operátorům. Rozměry a hmotnost koptéry jsou velmi příjemné a zpřístupňují tak průzkum i těch nejvíce stísněných prostor. Jsem nadmíru spokojený s letovým projevem mnou sestavené koptéry i s tím, jak kvalitní data dokáže koptéra zaznamenávat. I přesto, že mnou navržená řešení asistenčních letových režimů nejsou tak pokročilá, jako u komerčně vyráběných strojů s mnohonásobně větším výpočetním výkonem, byl jsem schopen mnoha parametry jako hmotností, rozměry, kvalitou videa, letovým časem a jinými, předčit komerčně vyráběné koptéry. Bohužel jsem neměl k dispozici prostředky na pořízení termální kamery nebo SLAM LiDARu pro 360° skenování nebo prostorovou navigaci, avšak to jsou systémy, které lze v případě budoucího vývoje tohoto projektu implementovat a koptéra je na ně částečně připravena.



Obrázek 101 - Autor s inspekční koptérou „Slídl“

Použité zdroje:

- [1] Bezpilotní letadlo | Wikipedia.org [online] | [cit. 16.10.2023] | Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bezpilotn%C3%AD_letadlo
- [2] Kettering Bug | VintageWings.ca [online] | [cit. 16.10.2023] | Dostupné z: <http://www.vintagewings.ca/VintageNews/Stories/tabid/116/articleType/ArticleView/articleId/484/The-Mother-of-All-Drones.aspx>
- [3] LiDAR vs fotogrammetrie pro letecký průzkum | Bezpilotne.cz [online] | [cit. 16.10.2023] | Dostupné z: <https://bezpilotne.cz/lidar-vs-fotogrammetrie-pro-letecky-pruzkum/>
- [4] DJI MAVIC 3 PRO | DJI.com [online] | [cit. 16.10.2023] | Dostupné z: https://www.dji.com/cz/mavic-3-pro?site=brandsite&from=landing_page
- [5] DJI Air 3 | dronpro.cz [online] | [cit. 16.10.2023] | Dostupné z: <https://dronpro.cz/dji-air-3>
- [6] DJI Mini 4 Pro | dronpro.cz [online] | [cit. 16.10.2023] | Dostupné z: <https://dronpro.cz/dron-dji-mini-4-pro>
- [7] Multispektrální snímkování | Wikipedia.org [online] | [cit. 22.10.2023] | Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Multispektr%C3%A1ln%C3%AD_sn%C3%ADmkov%C3%A1n%C3%AD
- [8] Letecké inspekce – termální a multispektrální | g4d.cz [online] | [cit. 22.10.2023] | Dostupné z: <https://www.g4d.cz/letecke-inspekce-termalni-a-multispektralni>
- [9] DJI MAVIC 3M | DJI.com [online] | [cit. 22.10.2023] | Dostupné z: <https://dronpro.cz/dron-dji-mavic-3m>
- [10] DJI MAVIC 3E | DJI.com [online] | [cit. 28.10.2023] | Dostupné z: <https://store.dji.com/cz/product/dji-mavic-3e-and-dji-care-enterprise-basic?vid=120171>
- [11] LIDAR a mračno bodů | eko-drony.cz | [cit. 6.11.2023] | Dostupné z: <https://www.eko-drony.cz/radce/lidar/>
- [12] Skydio 2+ | skydio.com | [cit. 14.11.2023] | Dostupné z: <https://www.skydio.com/skydio-2-plus-enterprise>
- [13] DJI Matrice 300 RTK | dronpro.cz | [cit. 25.11.2023] | Dostupné z: <https://dronpro.cz/dron-dji-matrice-300-rtk>
- [14] Flyability Elios 3 | Flyability.com | [cit. 26.11.2023] | Dostupné z: <https://www.flyability.com/elios-3>

Seznam tabulek:

Tabulka 1 – Porovnání parametrů komerční a autorem sestrojené koptéry

Seznam obrázků:

Obrázek 1 - Kettering bug | Dostupné z: <https://www.aerotelemetry.com/kettering-bug?pgid=kpx6txhi-bff49f64-a4a8-4828-b8cd-a82e212fdb7e>

Obrázek 2 - Kettering bug | Dostupné z: <https://www.aerotelemetry.com/kettering-bug?pgid=kpx6txhi-c4894bff-246e-4f45-8a47-4706f0599721>

Obrázek 3 - Queen Bee s ovládacím pultem | Dostupné z: <https://i0.wp.com/militaryhistorynow.com/wp-content/uploads/2019/09/A-Queen-Bee-and-its-radio-controllers.jpg?resize=650%2C435&ssl=1>

Obrázek 4 - Queen Bee | Dostupné z: <https://www.baesystems.com/en/heritage/dehavilland-tiger-moth---queen-bee>

Obrázek 5 - Lithiový článok | Dostupné z: https://techfun.sk/cs/produkt/li-pol-bateria-kablik-ochranny-obvod/?attribute_pa_bateria=523450-1000-mah&lang=cs¤cy=CZK&gclid=CjwKCAiA3aeqBhBzEiwAxFiOBuUrPC-2PO7WsYu6z9w32Pya1RRgk_3jplAnNYEC30J6A3fZEK1mHRoCLQoQAvD_BwE

Obrázek 6 - Elektronika kompaktního rozkládacího dronu | Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/mini-2>

Obrázek 7 - Vojenský dron MQ-9 Reaper | Dostupné z: <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2020/1/6/98-billion-expected-for-military-drone-market>

Obrázek 8 - Spotřebitelský dron DJI Phantom 4 | Dostupné z: <https://i-shopy.cz/dron-muze-slouzit-pro-zabavu-i-pro-praci/>

Obrázek 9 - Různé konstrukční řešení koptér | Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/guide/drones/drone-buying-guide/>

Obrázek 10 - Dron hračka | Dostupné z: <https://www.rotorama.cz/product/eachine-e010>

Obrázek 11 - Spotřebitelský dron DJI Mini 2 | Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/mini-2>

Obrázek 12 - Ukázka fotografie z dronu DJI Mini 2 | Obrázek autora

Obrázek 13 - Vybavený spotřebitelský dron DJI Mini 3 Pro | Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/mini-4-pro>

Obrázek 14 - DJI Mini 3 Pro odolávající extrémnímu větru | Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=cFf2g9By8rl>

Obrázek 15 - Drony firmy Autel, DJI, Skydio | Dostupné z: <https://dronexl.co/2021/07/08/dji-loses-market-share-skywatch/>

Obrázek 16 - Piloti Drone Racing League | Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/michaellore/2022/02/21/drone-racing-league-doubles-broadcast-reach-thanks-to-growing-global-interest/>

Obrázek 17 - Běžné vybavení FPV pilota | Dostupné z:
<https://dronexl.co/2023/03/16/perfect-fpv-setup-what-i-recommend/>

Obrázek 18 - Profesionální koptéra | Dostupné z:
<https://www.pozary.cz/clanek/209502-dji-matrice-210-je-dron-pro-profesionalni-pouziti-umi-nest-termokameru-flir/>

Obrázek 19 - Různý počet a uspořádání motorů koptéry | Dostupné z:
<https://filmora.wondershare.com/drones/types-of-drones.html>

Obrázek 20 - Jednomotorová koptéra | Dostupné z:
<https://www.hackster.io/news/ball-drone-v2-takes-off-with-just-one-propeller-67a36d07b04d>

Obrázek 21 - Průmyslová oktokoptéra | Dostupné z:
<https://www.dronernds.com/products/dji-agras-mg-1s-octocopter-agriculture-drone-craft-only-mg1scraft-dji>

Obrázek 22 - Letadlo s pevnými křídli ZOHD Talon | Dostupné z:
<https://www.3dxr.co.uk/fixed-wing-c27/fixed-wing-kits-c105/zohd-talon-gt-rebel-pnp-p3288>

Obrázek 23 - VTOL | Dostupné z: <https://www.droneassemble.com/product/vtol-uav-15kgs-payload-2-4-hours-endurance-mtow-50kgs-vtol-frame-kit/>

Obrázek 24 - DJI Mavic 3 | Dostupné z: <https://dronpro.cz/dron-dji-mavic-3-pro-dji-rc>

Obrázek 25 - DJI Air 3 | Dostupné z: <https://dronpro.cz/dji-air-3-fly-more-combo-dji-rc-2>

Obrázek 26 - DJI Mini 4 Pro | Dostupné z: <https://dronpro.cz/dron-dji-mini-4-pro-fly-more-combo-dji-rc-2-1>

Obrázek 27 - Princip inspekce multispektrální kamerou | Dostupné z:
<https://www.eurekaalert.org/news-releases/583324>

Obrázek 28 - DJI Mavic 3M | Dostupné z: <https://dronpro.cz/dron-dji-mavic-3m>

Obrázek 29 - Ukázka snímku z termokamery | Dostupné z:
<https://www.scantherm.co.uk/thermographic-roof-leak-surveys/>

Obrázek 30 - Mavic 3T | Dostupné z: <https://3gonshop.cz/produkt/dji-mavic-3-enterprise-fve-combo/>

Obrázek 31 - Ukázka 3D mapy zachycené LiDARem | Dostupné z:
<https://scalpgharb.com/gentlemen-microbuilding-training/?g=velodyne-lidar-sensors-power-emesent-s-hovermap-to-fly-ii-eR0bwWIR>

Obrázek 32 - Ukázka 3D modelu vytvořené fotogrammetrií | Dostupné z:
<https://frontierprecision.com/product/skydio-3d-scan/>

Obrázek 33 - Autonomní plán letu dronu Skydio | Dostupné z:
<https://support.skydio.com/hc/en-us/articles/6089477926171-How-to-use-Indoor-Capture-with-Skydio-3D-Scan>

Obrázek 34 - Skydio 2+ | Dostupné z:

https://morfreeov.xyz/product_details/48917101.html

Obrázek 35 - DJI Matrice 300 RTK | Dostupné z:

<https://geooprema.com/products/survey-equipment/drones-unmanned-aerial-vehicles-and-systems/dji-m300-rtk-matrice-300-rtk-zenmuse-l1-lidar-payload/>

Obrázek 36 - Inspekce nádrže pomocí koptéry Elios 1 | Dostupné z:

<https://www.startupselfie.net/2023/02/26/flyability-elios-3-drone-industrial-inspection-3d-mapping/>

Obrázek 37 - Inspekční koptéra Flyability Elios 3 | Dostupné z:

<https://www.startupselfie.net/wp-content/uploads/2023/02/Flyability-Elios-3-Underground-Inspection-Drone.jpg>

Obrázek 38 - Uhlíkový rám Explorer 4 | Dostupné z:

<https://flywoo.net/products/explorer-lr-4-frame-kit-v2-hd-analog-version?sku=18057623864618538095622494>

Obrázek 39 - Specifikace a schéma řídicí jednotky GOKU F745NANO | Dostupné z:

https://cdn.shopify.com/s/files/1/1349/4827/files/4K-Title-1_2048x2048_3a7c2843-e8b5-49bb-aaeb-99d622e52b8e.jpg?v=1625093082

Obrázek 40 - GNSS modul MG-A01 M10 s kompasem | Dostupné z:

https://vi.aliexpress.com/item/1005005592023005.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.20.3a621802Z4jNSK&gatewayAdapt=glo2vnm

Obrázek 41 - LiDAR s Optical Flow senzorem MTF-01 | Dostupné z:

https://vi.aliexpress.com/item/1005005545782306.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.19.3a621802Z4jNSK&gatewayAdapt=glo2vnm

Obrázek 42 - Regulátor GOKU 4IN1 ESC 20A | Dostupné z:

https://cdn.shopify.com/s/files/1/1349/4827/files/4K-Title-1_2048x2048_3a7c2843-e8b5-49bb-aaeb-99d622e52b8e.jpg?v=1625093082

Obrázek 43 - Schéma motoru NIN 1404 V2 2750Kv | Dostupné z:

<https://flywoo.net/products/nin-1404-v2-ultralight-fpv-motor>

Obrázek 44 - Ukázka analogového a digitálního video přenosu | Dostupné z:

<https://www.getfpv.com/learn/fpv-essentials/digital-fpv-is-it-the-future/>

Obrázek 45 - DJI O3 Air Unit | Dostupné z: <https://www.djitelink.cz/dji-o3-air-unit-p20341/#gallery>

Obrázek 46 - Analogové FPV brýle Skyzone SKY020 | Dostupné z:

https://www.fyft.cz/sky02o-skyzone-fpv-bryle/?variantId=59184&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA67CrBhC1ARIsACKAa8TfGXJLT_nCR9vDNeQGoE95TgfKY-ULIF-FXukF9dgSG3QbEkXOw4aAoVaEALw_wcB

Obrázek 47 - Digitální FPV brýle DJI Goggles 2 | Dostupné z: <https://www.fyft.cz/dji-goggles-2-o3-digitalni-fpv-bryle/>

Obrázek 48 - Přijímač TBS Crossfire Nano RX | Dostupné z:

<https://pyrodrone.com/products/tbs-crossfire-nano-rx>

Obrázek 49 - Přijímač TBS Crossfire Nano RX s Immortal-T anténou | Dostupné z: <https://pyrodrone.com/products/tbs-crossfire-nano-rx>

Obrázek 50 - RC vysílačka s externím Crossfire modulem v JR šachtě | Dostupné z: <https://oscarliang.com/crossfire-betaflight/>

Obrázek 51 - RC Vysílač TBS Crossfire Micro TX V2 | Dostupné z: https://www.team-blacksheep.com/products/prod:crossfire_micro_tx

Obrázek 52 - RC vysílačka Radiomaster TX16S | Dostupné z: <https://www.amazon.com/RadioMaster-Gimbals-Transmitter-Control-TX16SMKII-ELRS-M2/dp/B09YH5W2JP?th=1>

Obrázek 53 - RC vysílačka Radiomaster Boxer | Dostupné z: <https://www.fyft.cz/radiomaster-boxer-elrs-vysilacka-na-dron/>

Obrázek 54 - Cinewhoop s chráničem vrtulí | Dostupné z: <https://www.fyft.cz/cinelog35-v2-hd-avatar-gps-6s-pnp-geprc/>

Obrázek 55 - Prototypy ochranných klecí | Dostupné z: <https://desertdomes.com/pictures/dome/2vdiagram.gif>

Obrázek 56 - Lithiové články baterie | Dostupné z: <https://vi.aliexpress.com/item/1005002468306503.html?gatewayAdapt=glo2vnm>

Obrázek 57 - Schéma 4S a 2S baterie | Obrázek autora

Obrázek 58 - Schéma sériově a paralelně zapojených článků | Obrázek autora

Obrázek 59 - 4S 1500mAh Li-Po a 3000mAh Li-Ion baterie | Obrázek autora

Obrázek 60 - Schéma zapojení autorovi inspekční koptéry | Obrázek autora

Obrázek 61 - Montáž uhlíkového rámu | Obrázek autora

Obrázek 62 – Montáž motorů | Obrázek autora

Obrázek 63 - Umístění regulátoru otáček motoru | Obrázek autora

Obrázek 64 - Řídící jednotka osazena nad regulátor | Obrázek autora

Obrázek 65 - Připájený RC přijímač s anténou | Obrázek autora

Obrázek 66 - Upevnění GNSS modulu do 3D tištěné platformy | Obrázek autora

Obrázek 67 - Upevnění senzoru do 3D tištěné platformy | Obrázek autora

Obrázek 68 - Umístění O3 Air Unit do zádi koptéry | Obrázek autora

Obrázek 69 - Konstrukce gimbalu s osazenou FPV kamerou | Obrázek autora

Obrázek 70 - 18W osvětlení s chladičem | Obrázek autora

Obrázek 71 - Uzavřený kompletní rám koptéry | Obrázek autora

Obrázek 72 - Kompletní ochranná klec | Obrázek autora

Obrázek 73 - 4S 3000mAh Li-Ion baterie | Obrázek autora

Obrázek 74 - Firmware Flasher | Obrázek autora

Obrázek 75 - Záložka Ports | Obrázek autora

Obrázek 76 - Záložka Configuration | Obrázek autora

Obrázek 77 - Záložka Calibration | Obrázek autora

Obrázek 78 - Kalibrace kompasu | Obrázek autora

Obrázek 79 - Kalibrace Optical Flow senzoru | Obrázek autora

Obrázek 80 - Záložka GPS | Obrázek autora

Obrázek 81 - Záložka Failsafe | Obrázek autora

Obrázek 82 - Záložka Receiver | Obrázek autora

Obrázek 83 - Channel Map | Obrázek autora

Obrázek 84 - Záložka Modes | Obrázek autora

Obrázek 85 - DJI Assistant 2 s připojenou O3 Air Unit | Obrázek autora

Obrázek 86 - Rozvržení OSD elementů | Obrázek autora

Obrázek 87 - Schéma motorů | Obrázek autora

Obrázek 88 - Přiřazení serva | Obrázek autora

Obrázek 89 - Nastavení protokolu regulátoru a serv | Obrázek autora

Obrázek 90 - Koptéra s vybavením připravená k letu | Obrázek autora

Obrázek 91 - FPV záznam z koptéry v exteriéru | Obrázek autora

Obrázek 92 - Trasa letu s telemetrickými daty ve vzdálenosti tří kilometrů | Obrázek autora

Obrázek 93 - FPV záznam z koptéry v interiéru | Obrázek autora

Obrázek 94 - Ukázka 3D modelu konstrukce | Obrázek autora

Obrázek 95 - Prostup stísněnými prostory za tmy | Obrázek autora

Obrázek 96 - Ukázka 3D modelu konstrukce osvětlené za tmy | Obrázek autora

Obrázek 97 - Půdorys testovacího objektu | Obrázek autora

Obrázek 98 - FPV záznam v nejvzdálenějším místě objektu | Obrázek autora

Obrázek 99 - Uvězněná koptéra pod trámy zříceného krovu chmelárny | Obrázek autora

Obrázek 100 - Hledání vhodné přístupové trasy | Obrázek autora

Obrázek 101 - Autor s inspekční koptérou „Slídil“ | Obrázek autora