

Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
Katedra informačních technologií

**Analýza návrhu a konstrukce FPV GPS kvadrokoptéry s
autonomním řízením**

Diplomová práce

Autor: Bc. Petr Izák
Studijní obor: Aplikovaná informatika

Vedoucí práce: doc. RNDr. Petr Tučník, Ph.D.

Hradec Králové

duben 2023

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury.

V Hradci Králové dne 25.4.2023

vlastnoruční podpis

Bc. Petr Izák

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Petru Tučníkovi, Ph.D. za metodické vedení práce a cenné rady při jejím zpracování.

Anotace

Diplomová práce „Analýza návrhu a konstrukce FPV GPS kvadrokoptéry s autonomním řízením“ pojednává o problematice autonomních dronů a rozebírá jejich autonomii, která je nejčastěji podpořena strojovým učením či umělou inteligencí. Počáteční část práce je věnována bezpilotním autonomním systémům a jejich historii společně s vysvětlením oborů, jako je inteligentní autonomie, strojové učení či počítačové vidění. Zmíněny jsou i důležité legislativní normy EU společně s úrovněmi autonomie bezpilotních systémů. V druhé části jsou poté rozebrány jednotlivé oblasti využívání autonomních dronů společně s algoritmy strojového učení, které jsou v dané oblasti používány. Třetí část je věnována vnitřním komponentům autonomní kvadrokoptéry a jejich detailnímu rozboru. V části praktické se práce věnuje kompletnímu zkonstruování 5“ autonomní kvadrokoptéry, která je následně rozšířena o FPV systém. Druhá část je poté zaměřena na kalibraci a konfiguraci letové jednotky ve firmwaru iNav a následnou aplikaci kontrolního algoritmu PID, který kontroluje let kvadrokoptéry. Následující část obsahuje testy komerčních tras, které byly vytvořeny na základě oblastí, ve kterých jsou autonomní drony využívány. Na závěr práce byla vytvořena cenová analýza nákladů na konstrukci a porovnání zkonstruovaného dronu, s těmi již existujícími. Závěr práce obsahuje zhodnocení výstupů a subjektivní názory na možné rozšíření využívání autonomních dronů v budoucnosti.

Annotation

Title: *Analysis of Design and Construction of FPV GPS Quadrocopter with Autonomous Control*

The diploma thesis "Analysis of the design and construction of FPV GPS quadrocopters with autonomous control" deals with the issue of autonomous drones and their autonomy. The initial part of the thesis is devoted to unmanned autonomous systems and their history together with fields such as intelligent autonomy, machine learning or computer vision. Important EU legislative standards are also mentioned. In the second part, the individual areas of use of autonomous drones are analyzed together with the machine learning algorithms. The third part is devoted to the components of quadrocopter and their detailed analysis. In the practical part, the thesis deals with the complete construction of a 5" quadcopter, which is subsequently extended by an FPV system. The second part is focused on the configuration of the flight unit in iNav firmware and the subsequent application of the PID control algorithm. The following section contains tests of commercial routes. At the end of the thesis, a price analysis of the construction costs and comparison of the constructed drone with the existing ones was created. The conclusion of the thesis contains an evaluation of outputs and subjective opinions on the possible expansion of the use of autonomous drones in the future.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Bezpilotní autonomní systém	3
3.1	Inteligentní autonomie.....	5
3.2	Autonomní dron.....	7
3.2.1	Automatizovaný dron	10
3.3	Počítačové vidění.....	11
3.3.1	Rámcová anotace	11
3.3.2	Polygonová anotace.....	12
3.3.3	Obrazová segmentace	13
3.4	Strojové učení	16
3.4.1	Supervised Learning.....	17
3.4.2	Unsupervised Learning	18
3.4.3	Semi-supervised Learning	19
3.4.4	Reinforcement Learning	20
3.5	Evropská legislativa pro provoz dronů.....	23
3.6	Úrovně autonomie bezpilotních systémů	26
4	Oblasti komerčního využití autonomních dronů	27
4.1	Zemědělská oblast.....	29
4.1.1	Aplikace algoritmů Random Forest a Support Vector Machines	31
4.2	Logistická oblast	33
4.2.1	Aplikace algoritmu Q-Learning.....	35
4.3	Kompetitivní závody	37
4.3.1	Aplikace algoritmu Proximal Policy Optimalization.....	38
4.4	Bezpečnostní monitoring.....	40

4.4.1	Aplikace algoritmu Optimization-Based Decision-Making	42
5	Technická analýza autonomní FPV kvadrokoptéry	45
5.1	Rám	46
5.2	Letová jednotka.....	47
5.2.1	PID algoritmus	49
5.3	Regulátor	50
5.4	Motory	52
5.5	Přijímač	53
5.6	Akumulátor	54
5.7	FPV systém.....	55
5.7.1	FPV kamera	56
5.7.2	Video vysílač.....	57
5.8	Senzory zajišťující autonomii.....	58
5.8.1	GPS.....	59
5.8.2	Gyroskop	59
5.8.3	Magnetometr	59
5.8.4	Akcelerometr.....	60
5.8.5	Barometr	60
5.8.6	LiDAR.....	60
5.8.7	Sonar	60
5.8.8	Speed	60
6	Praktická část – Návrh technického řešení a postup konstrukce	61
6.1	Výroba dílů dronu pomocí 3D tisku.....	61
6.2	Instalace deskového regulátoru a motorů.....	62
6.3	Propojení letové jednotky a regulátoru.....	64
6.4	Instalace GPS s magnetometrem	65

6.5	Instalace FPV kamery	66
6.6	Instalace video vysílače.....	67
6.7	Instalace přijímače.....	68
7	Praktická část – Implementace řešení a konfigurace letové jednotky	69
7.1	Připojení letové jednotky a přepis firmware.....	69
7.2	Aplikace mixeru a nastavení motorů.....	70
7.3	Kalibrace GPS modulu a senzorů.....	71
7.4	Mapování koncových bodů a kanálů přijímače	73
7.5	AUX módy.....	74
7.6	Aplikace PID algoritmu	75
7.7	Konfigurace FPV systému	76
7.8	Evaluaace a dokončení konfigurace	77
8	Praktická část – Testování autonomních letů kvadrokoptéry	79
8.1	Aplikace plánovače misí pro trasu z oblasti zemědělství	80
8.2	Aplikace plánovače misí pro trasu z oblasti logistiky	82
8.3	Aplikace plánovače misí pro trasu z oblasti bezpečnostního monitor.....	84
8.4	Obecná sumarizace nákladů na let kvadrokoptéry	86
9	Praktická část – Rozbor nákladů na konstrukci kvadrokoptéry	87
9.1	Rozbor nákladů na konstrukci kvadrokoptéry.....	87
9.2	Srovnání vlastního řešení s již existujícími drony.....	88
10	Závěr.....	91
11	Seznam použité literatury	92
12	Přílohy	98

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 – základní autonomní funkce letové jednotky</i>	9
<i>Tabulka 2 – klasifikace automatizace a autonomie</i>	10
<i>Tabulka 3 – využití komponenty skip connections v různých architekturách</i>	14
<i>Tabulka 4 – Klasifikace algoritmů a technik pro trénování neuronové sítě</i>	17
<i>Tabulka 5 – Klasifikace algoritmů a technik pro trénování</i>	18
<i>Tabulka 6 – Klasifikace základních algoritmů zpětnovazebního učení</i>	22
<i>Tabulka 7 – Klasifikace evropské legislativy a porovnání s doplňkem X</i>	24
<i>Tabulka 8 – Klasifikace autonomních úrovní s detaily</i>	26
<i>Tabulka 9 – Pozitiva a negativa nejpoužívanějších architektur</i>	28
<i>Tabulka 10 – Výsledek letového experimentu na třech závodních trasách</i>	40
<i>Tabulka 11 – Nejrozšířenější oblasti využití bezpečnostních dronů</i>	41
<i>Tabulka 12 – Výsledky časů jednotlivých scénářů s parametry</i>	44
<i>Tabulka 13 – Evoluce vývoje letových jednotek</i>	48
<i>Tabulka 14 – Specifikace letové jednotky</i>	48
<i>Tabulka 15 – Specifikace regulátoru</i>	51
<i>Tabulka 16 – Specifikace motoru</i>	52
<i>Tabulka 17 – Specifikace přijímače</i>	54
<i>Tabulka 18 – Specifikace akumulátoru</i>	55
<i>Tabulka 19 – Specifikace FPV kamery</i>	57
<i>Tabulka 20 – Specifikace video vysílače</i>	58
<i>Tabulka 21 – Specifikace GPS modulu</i>	59
<i>Tabulka 22 – Konfigurační tabulka PID koeficientů</i>	75
<i>Tabulka 23 – Rozbor cen součástí zkonstruovaného řešení</i>	87
<i>Tabulka 24 – Porovnání komponentů kvadrokoptér</i>	89

1 Úvod

Pod pojmem dron si většina lidí vybaví bezpilotní letecký prostředek, který slouží k pořizování videí, focení nebo k jiným zábavným aktivitám. S postupným rozvojem inteligentní autonomie, strojového učení nebo počítačového vidění, jsou jejich algoritmy začleňovány do aplikací, automobilů, zařízení i dronů, což dalo za vznik autonomním dronům. Pod tímto pojmem můžeme nalézt takové drony, které jsou schopné samostatného letu bez zásahu člověka.

Tento koncept může být využit v budoucnosti i pro jiné účely nežli focení a záznam videa. Často diskutovaným tématem v oblasti letecké autonomie jsou letecká přeprava osob, zemědělské využití, bezpečnostní monitorování objektů nebo zejména doručování balíků. Pro tyto účely mohou být drony osazeny speciálními senzory a vybavením. Jedním z nejmodernějších vybavení je FPV systém, který dokáže přenést živé video na vzdálenost několika kilometrů, což může být využito k vykonávání rozmanitých činností.

Potenciál těchto dronů je opravdu velký, každopádně z důvodu nedostatečné informovanosti veřejnosti, společně s nutností provedení obtížné konstrukce a následného konfigurování je mnoho jedinců odrazeno. V budoucnu se předpokládá, že zájem o autonomní drony z hlediska komerčních účelů výrazně poroste a jejich asistence bude kladně vítána v mnoha vědních i komerčních činnostech.

2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je poukázat na možnosti využívání autonomních dronů v oblastech lidského působení a zkonstruovat autonomní 5“ kvadrokoptéru s FPV rozšířením, jejíž autonomní let je poté testován na jednotlivých komerčních trasách. Práce se také zaměřuje na definice algoritmů strojového učení, počítačového vidění i autonomních systémů. Dále jsou také rozebrány i legislativní normy pro létání a provoz bezpilotních prostředků v ČR. V práci jsou také detailně rozebrány jednotlivé oblasti využití těchto dronů společně s algoritmy, které jsou používány. Následně jsou detailně popsány všechny komponenty autonomního dronu. V části praktické je poté detailně popsána konstrukce dronu, včetně schémat, nastavení, letových testů i konečné cenové sumarizace. Práce je cílena všem, kdo mají zájem o bezpilotní systémy a FPV drony především z důvodu nedostupné literatury či informací v českém jazyce.

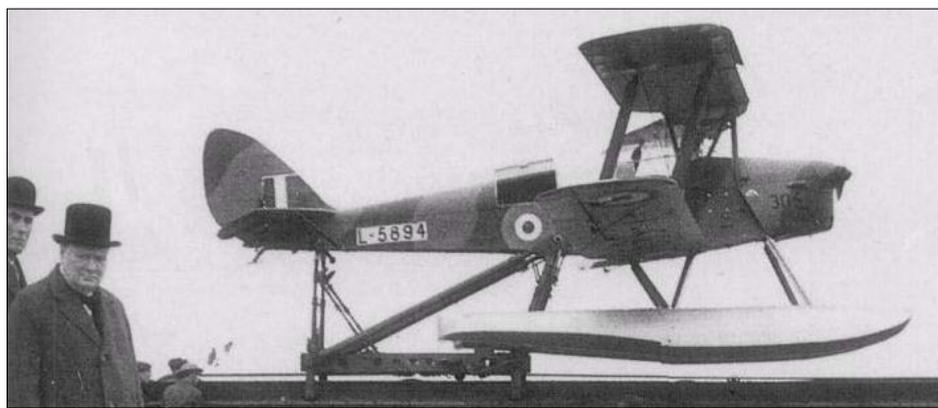
3 Bezpilotní autonomní systém

Letecký prostředek, který nemá na palubě pasažéry či posádku se nazývá bezpilotní. Obecně jsou tyto prostředky označovány jako UAV¹, pod toto označení spadají např. drony nebo letouny, které umožňují dálkové řízení operátorem či podporují autonomní funkce letu dle předem nakonfigurovaných souřadnic nebo dat získaných ze senzorů.

Z hlediska historie mezi první UAV jsou považovány horkovzdušné balóny, které byly vypuštěny roku 1849 nad italskými Benátkami za účelem bombardování. Nicméně pouze malé množství balónů zasáhlo svůj cíl.

V roce 1898 významný vynálezce Nikola Tesla představil principy radiového přenosu, pomocí kterých byl schopen zkonstruovat plně ovladatelnou lodičku s využitím radiových vln s určitou frekvencí (RF²). V průběhu první světové války byl britskou armádou vyvinut první rádiově ovladatelný bezpilotní letoun pod názvem **Aerial Target**, který sloužil zejména pro tréninkové účely armády.

Po skončení první světové války v meziválečném období začal vznikat další bezpilotní tréninkový letoun pod názvem **DH.82B**, známý jako „Queen Bee“ (viz Obr. 1). Byl využit zejména pro výcvik osádky protiletadlových kanónů. [1]



Obrázek 1 – DH.82B tréninkový bezpilotní letoun,
zdroj: <https://dronewars.net/wp-content/uploads/2014/10/6a6ad-de-havilland-dh82b-queen-bee.jpg>

¹ **UAV** – zkratka *Unmanned aerial vehicle* (v překladu *Bezpilotní letoun*)

² **RF** – zkratka *Radio Frequency* (v překladu *Radiová frekvence*), označují oscilační konstantu signálu

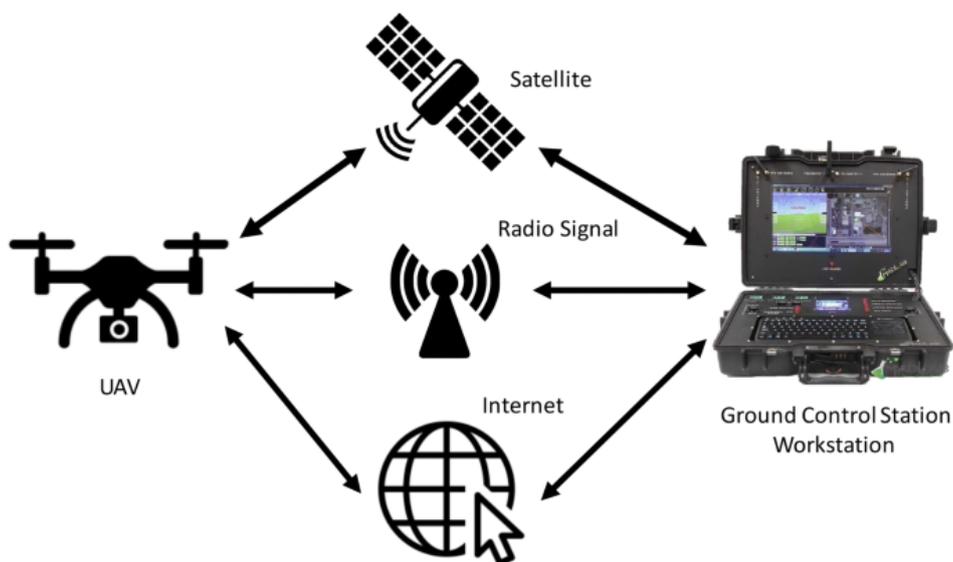
Další využití dronů přišlo již v roce 1955, kdy se rozpoutal válečný konflikt ve Vietnamu. Zde drony již neplnily pouze tréninkovou funkci, ale i funkci průzkumnou či bojovou.

Postupem času začaly být postupně vylepšovány, např. o technologii využití solární energie pro zvýšení letových časů a výšky letu. Toto postupné vylepšování mělo za následek vznik nových odvětví pro jejich využití jiných nežli vojenských. [2]

V současné době využívá drony široká veřejnost, složky IZS apod. Bezpilotní systémy jsou každodenními společníky při jejich rozmanitých činnostech. Z důvodu mylného označování většiny dronů za UAV byla vytvořena přesná označení jednotlivých dronů:

UAV (*Unmanned aerial vehicle*) – letoun, který nemá na palubě pilota a může být ovládán autonomně či ze vzdáleného místa. Zkratka označuje většinou (není pravidlem) armádní letoun, který je případně osazen potřebnými senzory pro autonomní let.

UAS (*Unmanned aircraft system*) – tento systém zahrnuje samotné UAV společně s fyzickým pilotem a kontrolní stanicí zprostředkovávající komunikaci mezi ním a letounem (viz Obr. 2).



Obrázek 2 – princip fungování UAS,
zdroj: https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs42452-020-2749-5/MediaObjects/42452_2020_2749_Fig1_HTML.png

RPA (*Remotely piloted aircraft*) – označení, které se používá spíše pro hobby drony, které vyžadují větší zkušenost s ovládáním např. metodou **LOS**³. Volnočasové drony jsou ovšem ve většině případů rozšířeny o FPV systém (viz Kap. 5.7). S využitím tohoto systému je možné dron vizuálně ovládat na velké vzdálenosti i v řádu několika kilometrů (dle úrovně použitého vybavení). [3]

3.1 Inteligentní autonomie

Pojmem inteligentní autonomie je myšlen systém, který je schopen vyhodnocovat či spravovat operace bez lidského zásahu. Slovo autonomie bylo odvozeno z řeckých slov „*autos*“, v překladu „já“ a „*nomos*“, v překladu „vláda“. Samotné slovo bylo využíváno již v 18. století ve filozofii. S rozšířením **AI**⁴ se autonomní systémy začaly využívat v různých oblastech lidského působení. V dnešní době se s autonomizací můžeme setkat zejména u aut, robotů, dronů či jiných zařízení, které automaticky využívají skupinu definovaných manévřů bez zásahu člověka. [4]

Autonomie také využívá pro sběr okolních dat řadu algoritmů z oblastí počítačového vidění, kdy zařízení dokáže zachytit obrazovou informaci, která je dále zpracována a dle výsledku vyhodnocena. Neuronové sítě jsou také další oblastí zkoumání, přičemž se považují za autonomní z důvodu spolupráce neuronových vrstev za účelem učení.

Vytvoření autonomního zařízení spočívá zejména ve vývoji algoritmů i sběru dat ze senzorů a mělo by být řízeno a strategicky plánováno dle určitého cíle, např. ovládání auta.

Cíl práce je poté myšlenkově rozdělen do pěti základních částí, kdy každá popisuje jeden provedený úkon:

Snímání – kalibrace senzorů na základě dat snímaných z reálného světa, ve většině případů se jedná o kamery či laserové senzory.

³ **LOS** – *Line of Sight* (v překladu přímá viditelnost), ovládání pomocí přímé viditelnosti dronu

⁴ **AI** – zkratka pro označení umělé inteligence

Datová fúze – data nasbíraná obrazovými senzory jsou seskupena do jednoho sumarizačního pohledu, který dává přehled o dění okolo zařízení. Dle kvality jednotlivých obrázků jsou setříděny. Z nejkvalitnějších obrázků je poté sestaven model, který se použije v pozdějších fázích.

Percepce – sestavený model je poté systémově analyzován na základě vyhledání důležitých informací. U autonomního vozu tyto hledané informace mohou být např. cesta, okolní vozy atd., u dronu např. stromy, překážky.

Systémové plánování – tímto postupným vyhodnocováním modelu jsou získána data, ze kterých je vyhodnocena nejlepší cesta. V této fázi se také využívají informace z jiných zdrojů (poloha zařízení či kontrola semaforů).

Finální kontrola – po naplánování cesty je spuštěna ovládací sekvence na zařízení, která zajišťuje jeho pohyb po trase. V průběhu pohybu je také kontrolováno, aby dané zařízení nebylo vychýleno z trasy např. silným větrem či nerovnostmi na vozovce atd. [4]

Tyto jednotlivé fáze jsou při pohybu zařízení opakovány v cyklu několikrát za sekundu, přičemž při každém průchodu jsou z kontrolní fáze odeslána data, čímž je zajištěna lepší kvalita modelu v dalším cyklu.

V roce 2019 byl představen koncept **fleet learning**, který spojuje funkci senzorů mnoha zařízení a datového úložiště. Tímto je umožněno zařízením sloučit jednotlivé hodnoty senzorů a tím vyhodnocovat efektivnější rozhodnutí na základě historických dat ze senzorů jiných zařízení, která byla na stejném místě v dřívějším čase.

Se stále rozrůstajícími možnostmi inteligentní autonomie vzniklo již několik startupů od významných firem, jako je např. IBM, Oracle či Waymo.

Firma **IBM** v roce 2020 představila svůj projekt autonomní jachty ovládané pomocí umělé inteligence, která dokáže na základě jejího rozhodnutí manévrovat s lodí a zabránit tak kolizím.

V roce 2019 **Oracle** vytvořil první autonomní databázi, která využívá AI algoritmy pro usnadnění vyhledávání a správy databáze.

V neposlední řadě firma **Waymo** v roce 2016 odstartovala projekt autonomního modulu s názvem „*Waymo Driver*“, který může být nainstalován na

střechu obyčejného automobilu a pomocí přídavného hardwaru připojen do řídicí jednotky vozu, čímž je zajištěno jeho plně autonomní ovládání (viz Obr. 3). [4]



Obrázek 3 – modul Waymo Driver osazen na automobilu značky Jaguar, zdroj: <https://thelastdriverlicenseholder.files.wordpress.com/2021/03/black-waymo-1.jpg>

Jak je již z obrázku patrné, autonomní zařízení se každodenně rozvíjejí a stále vznikají nové startupy v různých odvětvích lidského působení.

3.2 Autonomní dron

Spojením bezpilotních systémů a inteligentní autonomie vzniklo nové odvětví tzv. autonomních dronů. Drony této skupiny jsou také plně bezpilotní s integrovaným AI, které jim umožňuje provádět plně či částečně autonomní let pomocí dat získaných ze senzorů.

Vzhledem k tomuto rozšíření mohou operovat v různých odvětvích lidského působení v oblastech hospodářských, komerčních, armádních či zdravotních. Své využití nacházejí zejména v situacích, kdy může být plně využit potenciál AI, např. k průzkumu oblastí, kde je pro člověka nemožné přebývat delší dobu z důvodu vysoké radiace. [5]

Samotný autonomní let je zajištěn a udržován pomocí aktivní spolupráce třech hlavních kontrolních systémů, jimiž jsou:

Senzory – malá zařízení implementována v těle dronu, která jsou schopna měřit různé veličiny a předávat je řídicí jednotce dronu s možným implementovaným AI pro další zpracovávání. Základní údaje, které se pomocí senzorů sledují jsou: *GPS pozice, rychlost, výška, napětí, zrychlení, vzdálenost od okolních objektů, infračervené záření, úhlová rychlost⁵ atd.*

Tyto veličiny jsou dále využívány k informování pilota (rychlost letu, napětí baterie), zpracování pomocí AI (detekce kolizí) či pro využití ve strojovém učení a počítačovém vidění (rozeznávání objektů).

Aktuátory – mezi aktuátory můžeme zařadit elektrická zařízení využívající napětí, pneumatický nebo hydraulický tlak vykonávající určitou mechanickou nebo softwarovou funkci. Mezi tato zařízení spadají letové jednotky, digitální regulátory, motory či vrtule, ve speciálním případě jakékoliv zařízení, které je při letu využíváno dle určitého zaměření např. (vojenské – zbraně).

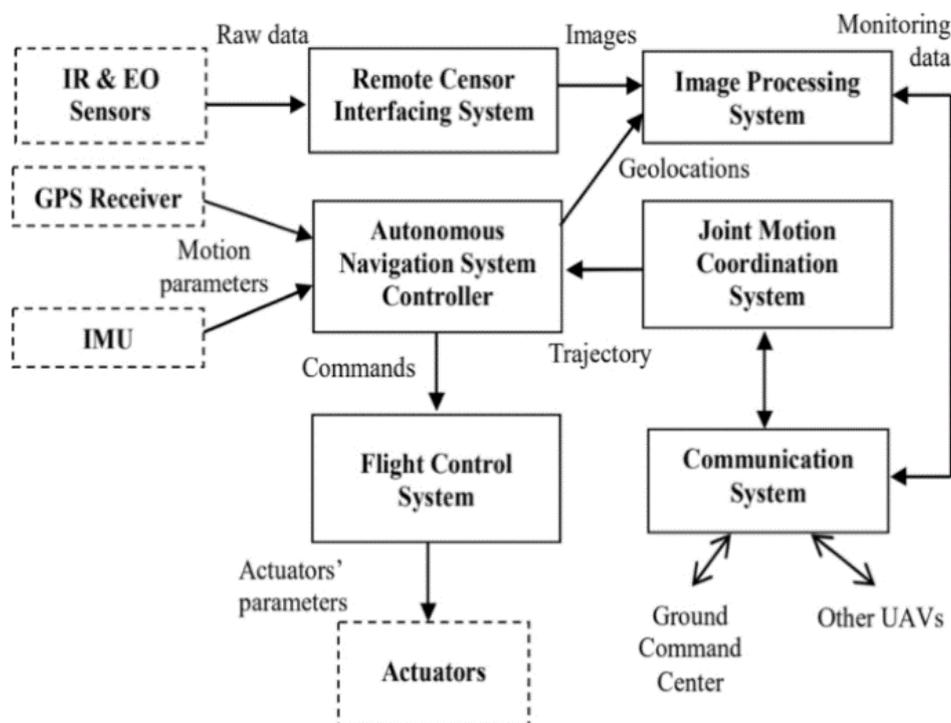
Firmware (kontrolní software) – úkolem firmwaru je rozdávat rozkazy jednotlivým komponentům dronu. Má také za úkol udržovat jeho stabilitu, komunikaci mezi pilotem a dronem, plánování misí či aktivně reagovat na data získaná z jednotlivých senzorů. Práce firmwaru se velmi podobá práci operačních systémů. Tento typ softwaru je zpravidla nahráván do letových jednotek, kde vykonává svoji činnost a udává rozkazy aktuátorům.

Na trhu existuje velké množství těchto firmwarů, kdy každý je určen pro rozdílné účely. [5]

- **Podpora autonomních prvků** – Ardupilot, PX4, iNav
- **FPV a manuální řízení** – CleanFlight, KISS, dRonin, BetaFlight

Kompletní diagram komunikace senzorů, aktuátorů a firmwaru letové jednotky (viz Obr. 4).

⁵ **úhlová rychlost** – veličina vyjadřující změnu úhlu za jednotku času, výpočet: $\omega = v / r$



Obrázek 4 – diagram cyklu komunikace kontrolních systémů, zdroj: https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs40435-020-00737-5/MediaObjects/40435_2020_737_Fig16_HTML.png

Jak je již z obrázku patrné, pomocí komunikace kontrolních systémů je možné zajistit plně autonomní let, kdy dron neustále kontroluje své okolí, zpracovává obrazové vstupy ze senzorů. V případě vyhodnocení nadcházející kolize pomocí AI, provede úpravu letové dráhy, čímž kolizi zabrání. [5]

Dnes se již do letových jednotek dronů implementují autonomní funkce, které po aktivování provádí danou činnost, základní funkce (viz Tabulka 1).

Tabulka 1 – základní autonomní funkce letové jednotky, zdroj: autor

Funkce	Popis
<i>Return to Home</i>	<i>Po aktivaci dron okamžitě zahájí návrat na pozici vzletu</i>
<i>Failsafe</i>	<i>Aktivováno při výpadku signálu, zahájí RTH</i>
<i>Orbit</i>	<i>Létání v kruhu při neustálém sledování jednoho bodu</i>
<i>Follow me</i>	<i>Schopnost následovat objekt pomocí algoritmů počítačového vidění</i>

3.2.1 Automatizovaný dron

Pokud označíme zařízení za automatizované, tvrdíme, že je schopno vykonávat určitou činnost pouze na základě naprogramování či zadaných inputů, nicméně není schopno se rozhodovat samostatně. Toto tvrzení platí i o dronech, kdy každý využívá různé autonomní úrovně, ale ne všechny jsou označovány jako autonomní.

Existují i drony, které se označují jako **automatizované**, tyto dva termíny se často zaměňují (viz Tabulka 2).

Tabulka 2 – klasifikace automatizace a autonomie, zdroj: autor

Úkon	Autonomie	Automatizace
<i>Lidský zásah</i>	<i>Není nutný</i>	<i>Nutný v případě překážek</i>
<i>Trasa letu</i>	<i>Autonomně naplánována</i>	<i>Přímým směrem mezi waypointy, algoritmus</i>
<i>Data ze senzorů, kamer či satelitů</i>	<i>Využívána AI pro rozhodování při letu (reaktivní autonomie)</i>	<i>Pouze pro orientaci dronu na trase (bez prevence kolize)</i>
<i>Strojové učení</i>	<i>Plně využívající</i>	<i>Možnost integrace</i>

Jak je již z tabulky patrné, **automatizované drony** při svém letu využívají různé algoritmy, které jim udávají přesnou výšku, dráhu či rychlost letu.

Takto naprogramovaný let je poté prováděn pouze mezi waypointy, a to většinou přímým směrem mezi nimi bez větších odchylek. Jak již bylo řečeno, autonomní drony se vyhýbají překážkám při letu na základě rozhodnutí AI. Toto tvrzení však neplatí pro drony automatizované, kde je nutný zásah pilota do řízení.

Pokud se opakuje stejná trasa letu, překážka není zapamatována a je nutný opětovný zásah pilota do řízení. Tento princip neplatí u autonomních dronů, kde se využívá učících algoritmů strojového učení a fleet learningu. [5]

3.3 Počítačové vidění

Pojem počítačové vidění je významnou oblastí deep learningu⁶, pomocí kterého je autonomní dron v průběhu letu schopen efektivně detekovat a rozpoznat objekty nacházející se na jeho letové dráze. Pomocí této funkce je také zajištěno provádění úhybných manévrů v případě detekování překážky. V podstatě se jedná o implementaci lidského oka do prostředí umělé inteligence.

Tato technologie funguje na bázi rozpoznávání vzorů. Důležitou roli v počítačovém vidění hrají algoritmy **strojové učení**, pomocí kterých je možné dron naučit identifikovat jednotlivé objekty pomocí modelů. Tento model je naplněn daty v podobě velkého množství obrázků jednotlivých překážek či objektů, které by se mohly nacházet na jeho cestě a na které se má primárně zaměřit. V průběhu učení je pomocí algoritmů vytvořen základní profil u každého objektu či překážky v podobě barvy, tvaru atd.

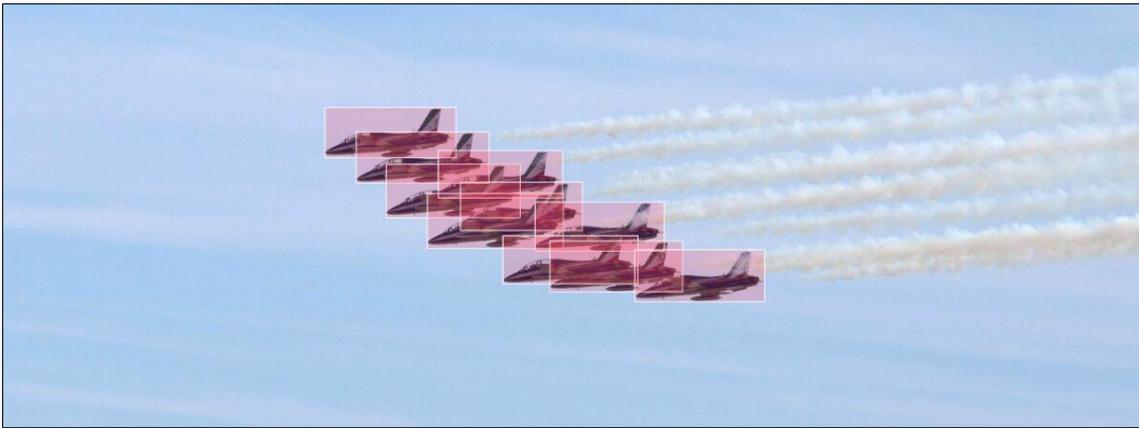
V průběhu letu dron snímá senzory okolí a vyhodnocuje obrázky, které poté klasifikuje na základě již naučených dat. Pomocí těchto nových inputů je dron každým dalším letem inteligentnější.

V průběhu učení také velice záleží na kvalitě datového setu, dle kterého je autonomní dron učen. Počítačové vidění využívá pro analýzu obrazových dat několik základních technik, které se obecně nazývají anotace. [6]

3.3.1 Rámcová anotace

Tato technika klasifikace obrazu využívá pro detekci objektů 2D rámce neboli „bounding boxy“ ve tvaru obdélníku. Každý z nich poté ohraničuje jeden sledovaný objekt, s touto metodou je pro AI jednodušší porovnat ohraničený objekt s již naučeným objektem, vyhodnotit jej a následně provést potřebné akce (eliminace, úhyb z trasy, notifikace). Obecně je tato technika využívána pouze pro hrubé rozpoznání běžných tvarů, které jsou na první pohled lehce rozpoznatelné. Pomocí obdélníkových rámců je také možné zhruba určit výšku a šířku objektu (viz Obr. 5).

⁶ *deep learning* – technika strojového učení využívající neuronové sítě



Obrázek 5 – vizualizace aplikace rámcové anotace na stíhacích letounech,
zdroj: https://uploads-ssl.webflow.com/614c82ed388d53640613982e/635b9f180ce3202c82e4e783_6320786c58342c03d3df9865_military-and-defence.jpeg

Rozšířením této 2D anotace do třídímního prostoru vznikají tzv. **cuboidy**. Tyto kvádry rozšiřují původní rámečky o hloubku, čímž jim dávají možnost jednoznačně ohraničit 3D objekty v reálném světě. Tato anotace je využita zejména v oblasti orientace autonomních vozidel, kdy jsou pomocí cuboidů vymežována okolní vozidla. [6]

3.3.2 Polygonová anotace

Polygonová anotace se využívá při nutnosti detailnějšího výběru objektu. Zachycuje jednotlivé úhly, křivky i linie objektu, pomocí kterých ho dokáže určit a ohraničit. Jedná se o velmi detailní anotaci, která dokáže detekovat i velmi složité či asymetrické objekty, např. střechy nebo koruny stromů (viz Obr. 6). [6, 8]



Obrázek 6 – aplikace polygonové anotace na motorových vozidlech,
zdroj: <https://keymakr.com/blog/content/images/2021/05/Sport1-1.jpg>

3.3.3 Obrazová segmentace

Segmentace obrazu se zabývá rozdělením digitálního obrazu na jednotlivé skupiny, které jsou nazývány segmenty. Takto segmentovaný obraz umožňuje hlouběji analyzovat jeho části, čímž poskytuje detailnější pohled na nahlíženou scénu z kamery dronu, přičemž se opět zaměřuje na detekci klíčových objektů. Přesnost detekce je měřena v pixelech a jedná se takto o nejpřesnější anotaci z počítačového vidění.

Segmentace obrazu je využívána nejen v kamerových systémech, které jsou na dronu osazeny, ale například i ve zdravotnictví (detailní rozbor výstupů z ultrazvuku) nebo kartografii⁷ (rozbor satelitního snímku země). Vstupním parametrem v případě záznamu z kamery dronu je série obrázků, které jsou následně rozebrány pomocí heuristických vlastností (barva, kontrast). Tyto vlastnosti následně pomáhají vymezit plochu objektu, jedná se o tradiční způsob segmentace. Technika heuristiky může být poměrně snadnou a rychlou volbou, jak dosáhnout samotné segmentace, ačkoli vyžaduje míru manuální korekce z důvodu vzniku odchylek při segmentování komplexnějších vstupů.

S vývojem strojového učení vznikly nové techniky pro segmentaci obrazu využívající **neuronových sítí**, které pro správnou funkčnost používají tři základní komponenty. [7]

- **Kódovací zařízení** – aplikace hloubkových filtrů na více vrstvách obrazu. Tato komponenta může být trénována na specifických vstupech pro dosažení dostatečné úrovně vědomostí potřebné k úspěšnému provedení segmentace.
- **Dekodér** – výstupy z kódovacího zařízení jsou dekodována pomocí vrstev v dekodéru, což formuluje barevnou segmentační masku ve stejném rozlišení jako původní vstupní obraz.
- **Skip connections** – metoda pro vynechání některých vrstev neuronové sítě.

⁷ **kartografie** – vědní obor zabývající se analýzou a znázornění povrchu země

Pro vstup do následující vrstvy jsou využity výstupy z vrstev předchozích. Tato metoda je vysoce efektivní v řešení tzv. **degradačního problému**⁸ v různých architekturách neuronových sítí. Zpravidla se v architekturách neuronových sítí využívá tři metod pro provedení klasifikace obrazu (viz Tabulka 3).

Tabulka 3 – využití komponenty skip connections v různých architekturách neuronových sítí, zdroj: autor, obr. [43–45]

Arch. síť	Popis fungování	Vizualizace
Reziduální	Využití reziduálních bloků ⁹ , předání informací do hlubších vrstev probíhá pomocí maticových operací	
Konvoluční	Každá vrstva získá vstupy od všech vrstev předchozích, kdy sama předá svá data všem vrstvám následujícím	
U-Net	Síť rozdělena na kodér a dekodér, kdy details učené v kodéru jsou předány do dekodéru pro vytvoření barevného obrazu (relace skip connections jsou vizualizovány šedou relací v obrázku)	

Jak je již z tabulky patrné, obrazovou segmentaci je možné efektivně vytvořit pomocí neuronových sítí, které jsou schopny řešit i vzniklý efekt degradace. [9]

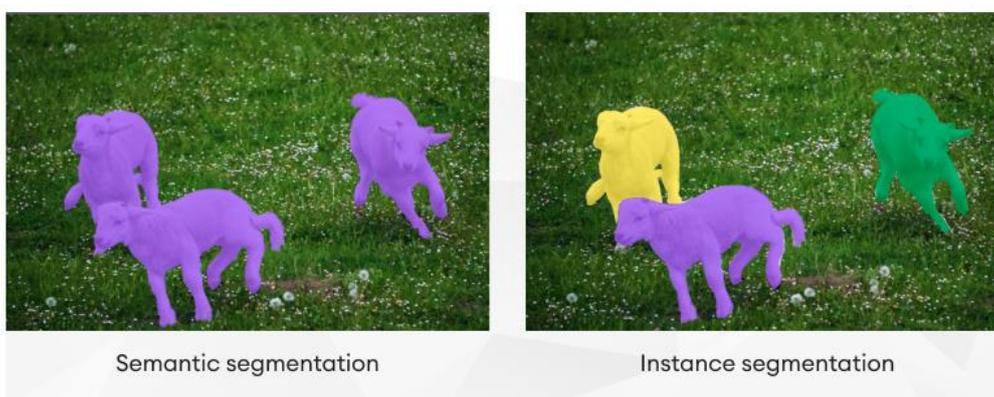
⁸ **degradační problém** – se stále rostoucí hloubkou architektury, při trénování neuronových sítí, klesá výkonnost modelu

⁹ **reziduální blok** – skupina vrstev, kdy výstup z vrstvy předchozí je přidán na poslední místo ve skupině bloku

Existují i takové techniky, které nevyužívají neuronových sítí pro vytvoření obrazové segmentace, ale spíše vycházejí z heuristických pravidel. Jedná se o **sémantickou, instanční a panoptickou** segmentaci.

Sémantická segmentace – spočívá v rozdělení obrazu pomocí jeho pixelů do specifických tříd. Tyto třídy jsou vždy spjaty s nějakým objektem scény (vozidlo, strom, budova), ke kterému jsou dané pixely přiřazeny. Třída většinou zahrnuje všechny zástupce a nerozděluje je na podtřídy, např. třída *Letecký prostředek* bude zahrnovat *drony, letadla i vrtulníky*. Tím může nastat problém, kdy objekty nacházející se v těsné blízkosti, mohou být vyhodnoceny jako jeden agregovaný. Tímto se tedy jedná o nejjednodušší a nejméně detailní techniku segmentace.

Instanční segmentace – oproti předchozí segmentaci, která využívá třídy, jsou zde vytvářeny jednotlivé objekty, z nichž jsou následně vytvořeny instance. Objekty jsou vymežovány pomocí jejich hranic. Instanční segmentace také rozpozná počet instancí v obrazu, které dokáže rozlišit. [6, 7]



Obrázek 7 – vizualizace rozdílů *sémantické a instanční segmentace*, zdroj: [https://uploads-](https://uploads-ssl.webflow.com/614c82ed388d53640613982e/635b9f1c6c2046227d57994b_6320785b9a7338072a090b05_semantic-segmentation-vs.-instance-segmentation-1.png)

[ssl.webflow.com/614c82ed388d53640613982e/635b9f1c6c2046227d57994b_6320785b9a7338072a090b05_semantic-segmentation-vs.-instance-segmentation-1.png](https://uploads-ssl.webflow.com/614c82ed388d53640613982e/635b9f1c6c2046227d57994b_6320785b9a7338072a090b05_semantic-segmentation-vs.-instance-segmentation-1.png)

Panoptická segmentace – kombinací předchozích dvou typů vznikla segmentace nová, označovaná jako panoptická. Jedná se o poměrně novou metodu segmentace představenou roku 2018 Alexandrem Kirillovem. Její algoritmus zpracovává sérii vstupů, z kterých jsou vytvořeny třídy, následně vyhodnoceny objekty, z nichž vznikají jednotlivé instance. Jedná se o nejpreciznější a poměrně

rychlou formu segmentace, která je využívána např. v oblasti autonomní přepravy, bezpilotních systémů apod. [7]

3.4 Strojové učení

Ideologie strojového učení (dále jen „ML“) spočívá v zajištění učení stroje pro adaptaci bez přímých instrukcí s využitím různých algoritmů a statistických modelů. Výstupy průběhu učení jsou často znázorňovány pomocí grafů. Tato technika, která je obstarávána umělou inteligencí se využívá již v mnoha zařízeních i aplikacích. Typickými zástupci využívajícími ML jsou například Facebook, Google překladač nebo i robot „Sophia¹⁰“, který pomocí ML dokáže rozpoznat situaci a k ní přiřadit vhodnou obličejovou mimiku. [10]

V oblasti UAV je ML společně s počítačovým viděním využíváno k rozpoznávání objektů a vnímání svého okolí. Nyní po vysvětlení základních principů může být řečeno, že autonomie dronu je primárně složena z **umělé inteligence, počítačového vidění, ML a deep learningu**, které jsou v hierarchii.

Neuronové sítě jsou základním prvkem v ML, umožňují reprezentovat získaná data a zpracovávat je tak, jako by byla zpracovávána lidským mozkiem. Základním prvkem neuronových sítí je podobně jako v lidském mozku tzv. **neuron**.

Neurony mají za úkol přijmout vstupní signál z právě učeného datasetu¹¹ nebo od neuronů umístěných v předchozí vrstvě. Tyto signály jsou poté transformovány pomocí přenosových funkcí.

Strojové učení využívá čtyř základních učících algoritmů, které jsou děleny dle jejich využití. [10]

- **Supervised Learning** (Učení s učitelem)
- **Unsupervised Learning** (Učení bez učitele)
- **Semi-supervised Learning** (Kombinace učení s a bez učitele)
- **Reinforcement Learning** (Zpětnovazebné učení)

¹⁰ [https://en.wikipedia.org/wiki/Sophia_\(robot\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sophia_(robot))

¹¹ **dataset** – termín označující kolekci dat

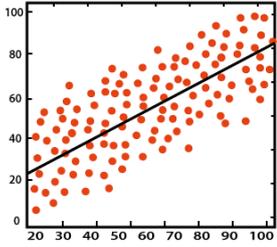
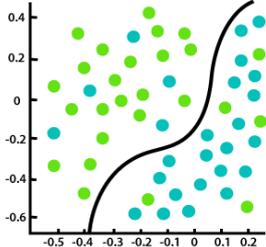
3.4.1 Supervised Learning

Jedná se o metodu, která pracuje na bázi trénování s využitím konceptů aproximace, kdy je po proběhnutí trénování vybrána funkce, která nejlépe popisuje daný vstup. Obecně by se dalo říct, že pro daný vstup x je hledáno nejvhodnější y na základě stálého upravování algoritmu, dokud není získán vhodný výsledek.

Tréninkový dataset vždy obsahuje vstupní data, ale i také správná data výstupní pro efektivní schopnost učení. V průběhu učení je vyhodnocována tzv. **ztrátová funkce**, která popisuje úspěšnost použitého algoritmu předpovědět správný výstup y . [11, 12]

Pro trénování se používají specifické algoritmy, které se dělí do dvou technik dle problémů, které jsou schopny řešit (viz Tabulka 4).

Tabulka 4 – Klasifikace algoritmů a technik pro trénování neuronové sítě s vyobrazením vzorců ztrátových funkcí, zdroj: autor, obr. [46]

Technika	Regresní	Klasifikační
Řešený problém	Rozlišení relace mezi závislými a nezávislými proměnnými	Zařazení testovacích dat do specifických tříd
Využití	Předpověď událostí, tržeb atd.	Rozlišení muži/ženy, booleovské podmínky
Ztrátová funkce	L1 Mean Absolute Error	Binary Cross Entropy
	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - x_i }{n}$	$J = \sum_{i=1}^N y_i \log(h_0(x_i)) + (1 - y_i) \log(1 - h_0(x_i))$
	L2 Mean Squared Error	Hinge loss
	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$\sum_{j \neq y_i} \max(0, s_j - s_{y_i} + 1)$
Specifické algoritmy	Lineární regrese, logistická regrese, polynomiální regrese	Statická klasifikace, metoda podpůrných vektorů, rozhodovací strom, k-nejbližších sousedů, náhodný les
Vizualizace		

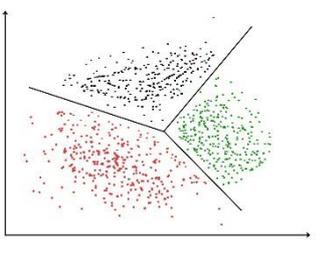
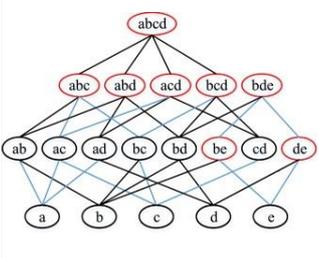
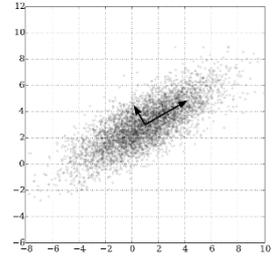
Hlavní nevýhodou této metody je: časová náročnost, nemožnost clusterování.

3.4.2 Unsupervised Learning

V této metodě probíhá učení pomocí tzv. **neoznačených dat**. Oproti supervised learningu se zde nenachází žádný učitel, který by kontroloval výstup dat. Algoritmus spočívá ve hledání skrytých vzorů v datasetu. Tento typ algoritmu je vhodný, pokud nevíme, co v datech přesně hledat. Výstupem z algoritmu jsou poté vzory, agregace datových bodů atd. [13]

Podobně jako v předchozí metodě učení jsou i zde využity učící techniky, ke kterým je přiřazeno několik algoritmů řešící různé problémy (viz Tabulka 5).

Tabulka 5 – Klasifikace algoritmů a technik pro trénování pomocí neoznačených dat, zdroj: autor, obr. [47–49]

<i>Technika</i>	Clustering	Association rule	Dimensionality reduction
<i>Řešený problém</i>	<i>Agregace neoznačených dat na základě jejich odlišností/podobnosti</i>	<i>Hledání relací a vazeb mezi proměnnými v datasetu</i>	<i>Řešení tzv. overfittingu¹², redukce inputů z důvodu zachování integrity</i>
<i>Využití</i>	<i>Segmentace informací o specifických objektech např. (UAV – minuty letu, provedené manévry, čas vzletu), počítačové vidění</i>	<i>Nalezení relací mezi zákazníkem a produktem, analýza a průzkum trhu</i>	<i>Redukce inputů na nižší úroveň z důvodu zachování integrity dat v datasetu</i>
<i>Specifické algoritmy</i>	<i>Shlukování metodou nejbližších středů, Gaussian mixture models</i>	<i>Apriori, FP-Growth, Eclat</i>	<i>Analýza hlavních komponentů, Singulární rozklad</i>
<i>Vizualizace</i>			

¹² **overfitting** – termín označující stav, kdy stále více dat generuje akurátnější výsledky

Mezi hlavní nevýhody této metody náleží: dlouhý čas zpracování, komplexita výpočtů, častá nepřesnost výsledků.

3.4.3 Semi-supervised Learning

Tento termín označuje kombinaci obou předchozích metod. Jedná se o metodu učení, kdy se využívá malých objemů označených dat společně s velkým objemem dat neoznačených. Tato kombinace umožňuje vytrénovat model pomocí malého množství označených dat a následně naučené schopnosti aplikovat na data neoznačená.

S využitím zmíněného způsobu je možné eliminovat problémy spojené s předchozí metodou např. klasifikaci dat, regresi i jejich clusterování.

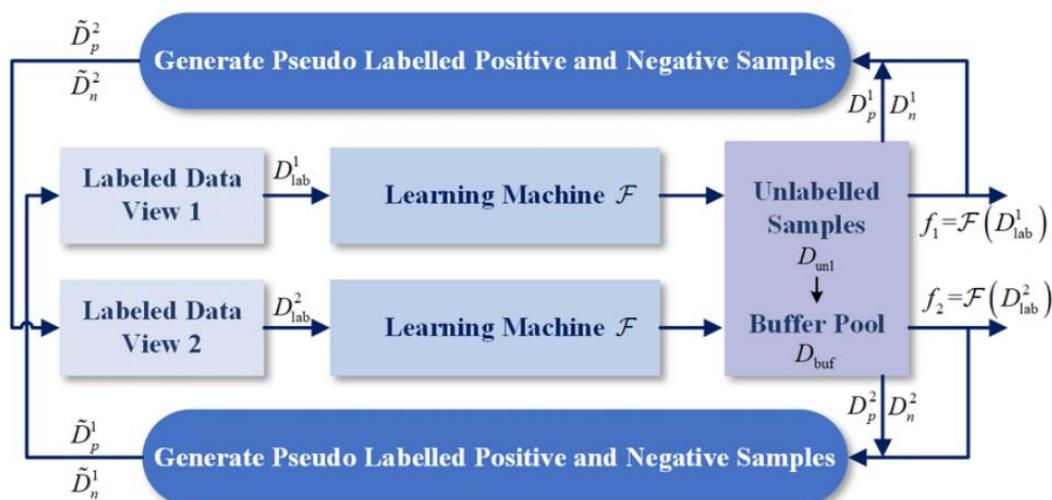
Semi-supervised learning pracuje s dvěma technikami, které jsou při trénování využity. [14]

Self-training (sebetrénink) – technika, která spočívá ve vybrání malého množství označených dat, které se využijí pro trénování. Následně se aplikuje tzv. **pseudo-labeling**, který má za úkol pomocí částečně trénovaného modelu předpovědět výstupy pro zbývající neoznačená data. Tyto výstupy jsou poté označovány jako „pseudo“. V další fázi se již určuje procentuální důvěryhodnost dat a testuje se následující podmínka. Pokud je důvěryhodnost pseudo výstupu vyšší než 80 %, je přidána k datům označeným, které jsou určeny jako vstup. Obvykle tento proces probíhá v několika desítkách iterací, kdy se výkon zvyšuje při každém průběhu.

Co-training (kooperační trénink) – jak již název napovídá, tato technika učení využívá dva klasifikátory, které poskytují dva různé pohledy na data. I zde se uvažuje malé množství označených dat. Na začátku procesu jsou vytvořeny dva klasifikátory, kdy každý je nezávisle trénován na stejném datasetu. Stejně jako u předchozí metody jsou poté přidána neoznačená data, z kterých jsou vytvořena jednotlivá pseudo.

Následně probíhá klasifikace na základě procentuální úspěšnosti. Pokud první klasifikátor stanoví vyšší důvěryhodnost dat než druhý, proběhne jejich předání a následně aktualizace druhého klasifikátoru. Posledním krokem procesu je

konečná kombinace výstupů obou klasifikátorů pro jeden akurátní výsledek. Kompletní vizualizace procesu (viz Obr. 8). [14]



Obrázek 8 – kompletní vizualizace procesu Co-training, zdroj: <https://www.researchgate.net/profile/Jingzheng-Tu/publication/349350701/figure/fig5/AS:991994050514944@1613521220055/The-illustration-of-the-semi-supervised-co-training-method.ppm>

Tento typ strojového učení se využívá zejména pro klasifikaci a rozpoznání audio nahrávek, webového obsahu i textových dokumentů.

Mezi hlavní nevýhody této metody náleží: komplexní iterační proces, časová náročnost, nevhodnost při výskytu vyššího počtu označených dat.

3.4.4 Reinforcement Learning

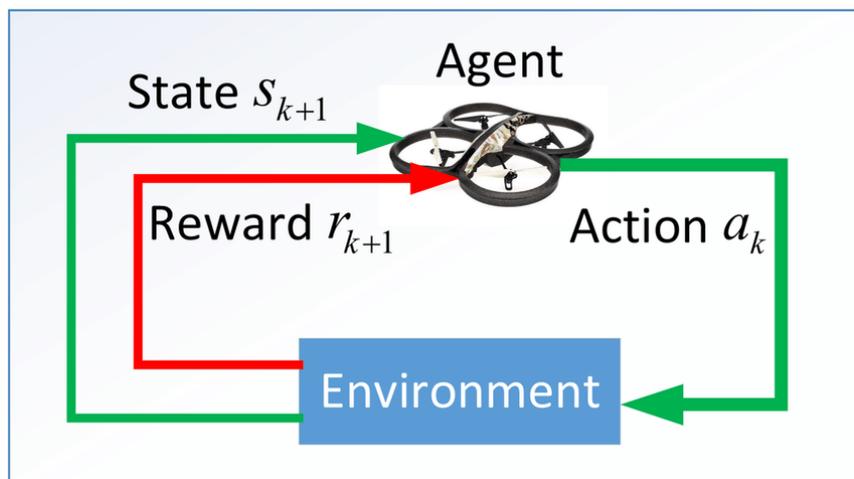
Poslední a zároveň nejpoužívanější metodou v oblasti autonomních dronů je zpětnovazebné učení (dále jen „RL“). Jak již název napovídá zpětná vazba je klíčovým faktorem této metody.

Hlavní entitou je **agent**, který interaguje s prostředím a získává zpětnou vazbu. Jeho interakce s prostředím probíhají metodou pokus omyl, kdy dochází k postupnému iteračnímu učení na základě akcí a zkušeností, které v prostředí provedl či získal. Na rozdíl od supervised learningu, kdy jsou v průběhu učení dostupná i správná data, RL využívá ideologii **odměn a trestů** pro určení správného či špatného chování agenta v prostředí. Hlavním úkolem agenta je tedy maximalizovat odměny a minimalizovat tresty. [15]

Zpětnovazebné učení se skládá z pěti hlavních elementů.

- **Agent** – autonomní entita, snažící se dosáhnout svého cíle pomocí akcí provedených v prostředí
- **Environment** (Prostředí) – prostředí, ve kterém agent působí
- **State** (Stav) – aktuální stav agenta v prostředí, může obsahovat aktuální sumarizaci všech dosud získaných odměn
- **Reward** (Odměna) – představuje cíl, agent usiluje o optimalizaci svého chování pro maximalizaci odměny a minimalizaci trestů
- **Policy** (Strategie chování) – popisuje, jak se agent chová ve specifický časový úsek, dále také mapuje jednotlivé stavy na akce. Strategie algoritmů RL může být dvou typů.
 - **On Policy** (Využívající strategii) – agent si osvojí hodnotu na základě jeho akcí, které provedl v rámci strategie
 - **Off Policy** (Nevyužívající strategii) – agent si osvojí hodnotu na základě jiné strategie než té, která se používá pro výběr akcí. Nicméně v tomto typu není nutné strategii použít.

Spoluprací těchto elementů je možné zajistit učení agenta, které probíhá v cyklu, obecně se tomuto procesu říká **Markovův rozhodovací proces** (viz Obr. 9).

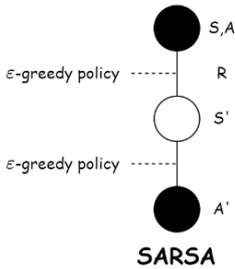
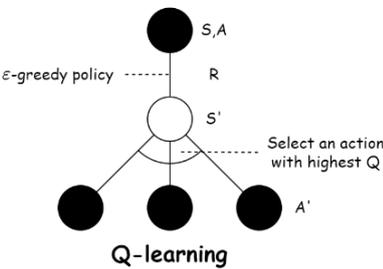


Obrázek 9 – cyklus učení agenta pomocí Markovova rozhodovacího procesu, zdroj: <https://www.researchgate.net/profile/David-Feil-Seifer/publication/322537496/figure/fig2/AS:583627708579841@1516159097573/Reinforcement-Learn>

Markovův rozhodovací proces (dále jen „MRP“), je základem ML, který obecně vychází z diskrétního matematického kontrolního procesu. MRP je složen z množiny stavů prostředí S_{k+1} , množiny možných akcí A_k , funkce odměny R_{k+1} a přechodového modelu P .

Algoritmy zpětnovazebního učení můžeme rozdělit dle kritéria, zda pro své učení využívají model či nikoliv. Agent, který je schopen předpovědět budoucí odměnu za provedenou akci dříve, než ji skutečně provede, využívá algoritmus založený na modelu. Pokud agent provádí akce, kdy předem nezná výsledek, můžeme tvrdit, že využívá algoritmus, který není založen na modelu. Klasifikace základních algoritmů RL (viz Tabulka 6). [15]

Tabulka 6 – Klasifikace základních algoritmů zpětnovazebního učení, zdroj: autor, obr. [50]

<i>Algoritmus</i>	SARSA <i>(State-action-reward-state-action)</i>	Q-Learning
<i>Model</i>	<i>Bez modelu</i>	<i>Bez modelu</i>
<i>Strategie</i>	<i>On Policy, využívá MRP</i>	<i>Off Policy</i>
<i>Vzorec SARSA</i>	$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha(r_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t))$	
<i>Vz. Q-Learning</i>	$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha(r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t))$	
<i>Princip</i>	<i>Agent pracuje na základě strategie chování a vzdělává se ze svých provedených akcí v tomto stavu, předchozí odměny a stavy nejsou při trénování uvažovány</i>	<i>Agent nepoužívá strategii chování a usiluje o napodobení akcí z předchozích stavů, za účelem získání maximální odměny. Používá proměnnou Q, která určuje kvalitu provedení akce za účelem budoucí odměny</i>
<i>Vizualizace</i>	 <p style="text-align: center;">SARSA</p>	 <p style="text-align: center;">Q-learning</p>

Mezi nevýhody této učící metody náleží: nutnost vysoce komplexního řešeného problému, cenová náročnost. [16]

3.5 Evropská legislativa pro provoz dronů

Létání s bezpilotními letouny na území ČR bylo do konce roku 2020 upravováno pomocí tzv. **L2 – Doplnku X**, který byl spravován Úřadem pro civilní letectví (dále jen „ÚCL“). Tento předpis sloužil k obeznámení pilotů o letových zónách, pravidlech při létání i bezpečnosti a dělil je na dvě základní skupiny: **profesionální a hobby využití**. Drony byly poté děleny na několik tříd dle jejich hmotnosti. [17]

V dnešní době se již doplněk X nevyužívá z důvodu nástupu nové jednotné legislativy zahrnující všech 27 členských států EU. Jednotná evropská legislativa je spravována Evropskou agenturou pro bezpečnost letectví (dále jen „EASA“). Mezi zásadní důvody zavedení nové centralizované legislativy náleží:

- Vznik jednotných a komplexnějších pravidel, čímž zmizí potřeba studování pravidel dané země při zahraniční cestě
- Možnost efektivnější expanze dronů po celé EU a podpora ekonomiky tohoto odvětví
- Zvýšení bezpečnosti při provozu, zvýšení ochrany životního prostředí

Evropská legislativa je tvořena ze tří hlavních kategorií, ve kterých se nachází podkategorie. V každé z nich se poté nachází několik tříd. Pokud pilot provozuje stroj o hmotnosti nad 250 gramů je povinen absolvovat online školení na webu ÚCL. Při provozu stroje o hmotnosti nad 25 kg musí provést teoretickou i praktickou zkoušku prezenčně na ÚCL. V obou případech je po úspěšném dokončení vystaven **doklad o absolvování výcviku** obsahující identifikační číslo, kterým musí být dron označen z důvodu snadnější identifikace provozovatele dronu (viz Obr. 10). [18]



Obrázek 10 – osobní doklad o absolvování online výcviku pro kategorii OPEN, zdroj: autor

Tabulka 7 – Klasifikace evropské legislativy a porovnání s doplňkem X, zdroj: autor

	Kategorie	Hmotnost			
		do 0,91 kg	0,91 – 7 kg	7–25 kg	nad 25 kg
Doplňěk X (viz Příloha 1)	Hobby (sportovní či rekreační)	Bez nutnosti evidence D+P			Nutnost evidence D+P
		Nutnost dodržení LOS, seznámení se s příručkou	Failsafe systém, příručka, ohlášení událostí		Failsafe, příručka, ohlášení událostí, povolení k letu, štítek
		Nutnost evidence D+P a štítku			
	Profesionální činnost (komerční, provádění studií)	Povolení k letu, pojištění, failsafe systém	Povolení k létání, failsafe systém, hlášení událostí, dozor		
Evropská legislativa (orientační schéma viz Příloha 2)	Open (Otevřená) Maximální hmotnost 25 kg, omezení na osazení kamer, maximální možná rychlost 19 m/s, maximální výška 120 m, minimální věk 16 let	Provozní omezení	Subkategorie	Hmotnost	Popis
		A1 (možnost letu nad lidmi, maximální vzdálení 50 metrů)	C0	do 250 g	Nutnost prostudování manuálu, jedná se o „hračky“, bez nutnosti registrace, pokud není osazen kamerou
			C1	250–900 g	Nutnost registrace i štítku, školení online na ÚCL, max 85 dB
		A2 (min 30 metrů od lidí, 150 m od obytných ploch)	C2	0,9 – 4 kg	Registrace, štítek, online školení, maximální napětí 48 V, musí být vybaven světly
		A3 (určeno pro let ve vyhrazených zónách, 150 m od obytných ploch)	C3	4–25 kg	Registrace, štítek Maximální velikost modelu do 3 m, osazen světly
		C4	4–25 kg	Bez omezení rozměrů, nutnost manuálního ovládní	
	Specific (Specifická)	Využívá označení: SAIL I – VI (označuje úroveň bezpečí při letu či na zemi)		nad 25 kg	Nutnost pojištění, praktické testy na ÚCL, od 16 let, scénář provozu
	Certified (Certifikovaná)	Bezpilotní prostředky s nejvyšší mírou rizika, drony pro přepravu osob, zboží. Tato kategorie se uvažuje již do budoucna, kdy využití dronů bude exponenciálně vyšší nežli nyní.			

Z tabulky je patrné, že legislativa doplňku X byla patřičně mírnější v pravidlech oproti té evropské, která přináší detailnější rozbor jednotlivých skupin a dělí drony dle dalších vlastností nejen na základě hmotnosti. Zároveň klasifikuje letouny těžší než 25 kg a v neposlední řadě zahrnuje budoucí využití dronů v oblasti přepravy osob či transportu balíků. [17]

Doplňek X také v minulosti vymezoval několik základních **bezletových zón**, kde nebylo možné provést let vůbec nebo pouze s omezenými restrikcemi. Tato pravidla přetrvávají, výpis všech aktuálních bezletových zón je nyní možné zobrazit pomocí webové aplikace **AisView**¹³, mezi základní z nich společně s barevným označením náleží:

- **CTR** (Okrsek řízených letišť) – jedná se o plně bezletovou zónu v bezprostřední blízkosti letiště *Oblast řízeného letiště¹⁴*
- **Prohibited** (**Zakázaná oblast**) – plně zakázaná oblast zahrnující např. muniční sklady, elektrárny apod.
- **Dangerous** (**Nebezpečná oblast**) – v této oblasti je možné provádět let, nicméně je omezen restrikcemi z důvodu zachování bezpečnosti
- **ATZ** (Letištní dopravní zóna) – má podobu kružnice s průměrem 11 km okolo základny letiště, je zde možné létat na základě dohody s daným letišťem *Oblast neřízeného letiště¹⁵*
- **TSA/TRA** (**Dočasně segregovaná/vyhrazená oblast**) – prostory, které jsou dostupné pro let pouze v určitých hodinách, nutné sledovat AisView

Mimo zmíněné zóny je také zakázán let bezpilotních prostředků v oblasti **ochranného pásma**, které je vytyčeno v blízkosti pozemních komunikací, armádních objektů, národních parků či nadzemních sítí. [17]

Za porušení pravidel při letu hrozí pokuta u fyzických osob až 80 000 Kč, u právnických osob až 240 000 Kč. V případě porušení bezletové zóny se může jednat až o trestný čin obecného ohrožení.

¹³ <https://aisview.rlp.cz/>

¹⁴ **řízené letiště** – označení letiště, které využívá řízení letového provozu pro účinný management letů

¹⁵ **neřízené letiště** – nevyužívá řízení letového provozu, řízení na základě plánu činností, radiostanice

3.6 Úrovně autonomie bezpilotních systémů

V předchozích kapitolách byly rozebrány jednotlivé vědní oblasti, které dohromady vytvářejí základ autonomie dronu. S jejich stále rostoucí nabídkou na trhu je nutné je dělit dle míry autonomie, kterou jsou při letu schopny plnit.

Z tohoto důvodu bylo vytvořeno šest úrovní autonomie pro jejich jednoznačnou klasifikaci (viz Tabulka 8). [19, 20]

Tabulka 8 – Klasifikace autonomních úrovní s detaily, zdroj: autor

		Úroveň autonomie					
		0	1	2	3	4	5
Zásah do řízení	Pilot						
	UAV						
Autonomie		Žádná	Slabá	Částečná	Podmíněná	Silná	Plná
Vyhýbání překážkám		Žádná	Detekce s varováním (detekuje překážku a upozorní pilota)		Detekce s vyhnutím (detekuje překážku a zastaví pohyb)	Detekce s navigací (detekuje překážku, upozorní pilota a provede úhybný manévr)	
		Stručný popis			Aplikační oblast		
Úroveň 0		Plně manuální řízení pilotem			FPV drony (racing), rekreace		
Úroveň 1		Řízeno pilotem, funkce držení pozice či RTH			Zabezpečení, Fotografování, Kontrolní činnosti		
Úroveň 2		V případě problémů pilot přebírá let, využívá plánovač misí			Fotogrammetrie ¹⁶ , Ovlažování a výsadba půdy		
Úroveň 3		Samostatný let, zastavení při detekci překážky			Doručování balíků, Průzkumní činnosti, Mapování terénu		
Úroveň 4		Let možný bez zásahu pilota, který je určen pouze jako dozorčí			Kinematografie, Fotografování		
Úroveň 5		Plně autonomní let			Prozatím neexistující (přeprava osob)		

¹⁶ **fotogrammetrie** – věda zabývající se měřením a polohou objektů vyobrazených na fotografiích

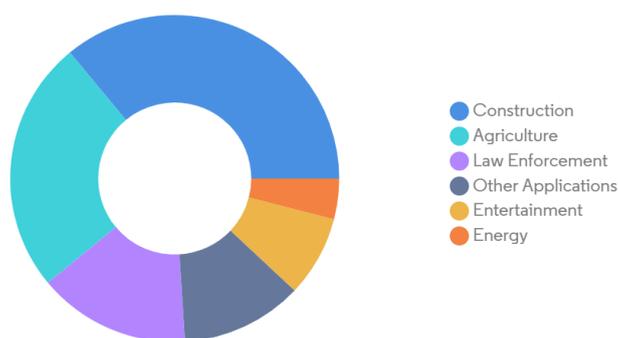
4 Oblasti komerčního využití autonomních dronů

V posledních letech zájem o autonomní drony v oblastech průmyslového a akademického průzkumu mnohonásobně vzrostl. Možnost vzdáleného působení a provádění určitých akcí bez zásahu člověka je vysoce efektivní z hlediska úspory času a vynaložené práce. Implementace autonomních dronů využívajících algoritmů strojového učení, počítačového vidění i umělé inteligence našla využití zejména v komerčních sektorech jako např. **zemědělství, logistika, kompetitivní závody, bezpečnostní monitoring** aj.

Se stále rostoucími možnostmi využití těchto dronů roste i jejich zastoupení na trhu. Na základě studie provedené v roce 2019 pod názvem „*Unmanned Aerial Vehicle in the Machine Learning Environment* [21]“, bylo zjištěno, že za rok 2016 byly celosvětové příjmy z prodeje UAV přibližně **půl miliardy dolarů**.

Ke konci roku 2022 byly tyto příjmy několikanásobně vyšší, a to přibližně na částku **7 miliard dolarů**, což potvrzuje fakt celosvětově rostoucího zájmu o drony. Od roku 2022 do 2025 se předpokládá až jejich dvojnásobný vzrůst. Globální vizualizace příjmů z prodeje dronů dle jejich využití (viz Obr. 11). [21]

Drones Market: Revenue (%), by Application, Global, 2021



Source: Mordor Intelligence



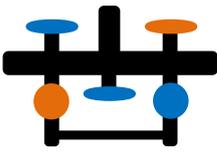
Obrázek 11 – vizualizace procentuálních příjmů z prodeje dronů dle jejich využití, zdroj: https://s3.mordorintelligence.com/drones-market/1646135373991_drones-market_Drones_Market_Revenue_by_Application_Global_2021.png

Konstrukce jednotlivých dronů se mohou lišit na základě benefitů/nevýhod,

kteřé pro jednotlivé komerční sektory přinášejí. Obecně se používají tři základní typy a to:

- **Multikoptéra** – pomocí svých 3–8 bezkartáčových motorů dokáže vytvořit vysoký **dynamický vztlak**¹⁷. Tímto je schopna dosáhnout prudké akcelerace a provádět let ve vysoké rychlosti. Nejpoužívanějším typem konstrukce je kvadrokoptéra, která je osazena zpravidla čtyřmi motory.
- **Pevné křídlo** – řešení, které je osazeno zpravidla dvěma motory. Na rozdíl od kvadrokoptéry vzlet a přistání probíhá horizontálně a je nutné využít přistávací dráhu. Pomocí trupu a dvou křidel je schopno dosáhnout velkých letových vzdáleností za minimální spotřebu energie.
- **VTOL** – z angl. *Vertical Take-Off and Landing*, popisuje kombinaci kvadrokoptéry a pevného křídla. Vzlet probíhá vertikálně a při dosažení bezpečné výšky jsou motory postupně otáčeny ve směru letu, tímto je zajištěn let horizontální let. Přistání poté probíhá opačným způsobem.

Tabulka 9 – Pozitiva a negativa nejpoužívanějších architektur, zdroj: autor, vysvětlivky: směr otáčení motorů – **clockwise**, **counterclockwise**

	Multikoptéra	Pevné křídlo	VTOL
Vizualizace			
Pozitiva	<i>Manévrovatelnost, vysoká akcelerace, cena, vertikální vzlet, hold funkce¹⁸</i>	<i>Schopnost letu v řádu hodin, zpravidla spalovací motory, výška letu, vyšší hmotnost nákladu</i>	<i>Horizontální i vertikální vzlet, let v řádu hodin, vysoký budoucí potenciál</i>
Negativa	<i>Krátké doby letu, zpravidla elektrické motory, nižší hmotnost nákladu</i>	<i>Cena, obtížnost ovládání, horizontální vzlet (nutnost odpalovacího zařízení)</i>	<i>Malé zastoupení na trhu, technologie stále ve vývoji, nutnost vysoce zkušeného pilota, cena</i>

¹⁷ **dynamický vztlak** – síla, která působí při letu na vrtule či křídlo a udržuje tak letoun ve vzduchu

¹⁸ **hold funkce** – funkce, která je schopna držet multikoptéru na dané pozici a v určité výšce

4.1 Zemědělská oblast

Využívání autonomních dronů rapidně roste ve všech komerčních sektorech. Nejvyšší růst je však zaznamenán v oblasti zemědělské, kde drony plní řadu důležitých činností pro zajištění kvality půdy. Dron v letu získává pomocí senzorů informace, které jsou zpracovány v dalším postupu známém jako precizní zemědělství¹⁹. Dle dostupných informací má tento způsob tendenci zvýšit úrodu až o 5 %. Mezi základní zemědělské činnosti prováděné drony náleží: **aplikace postřiků, výsadba a sběr informací**. [22]

Aplikace postřiků – jedná se o základní činnost prováděnou drony, která je nejvíce rozšířena v zemích Asie. Dle dostupných informací až 30 % půdy je ovlažováno drony zejména z důvodu těžce přístupných oblastí. Drony také mohou aplikovat postřiky vhodné pro hubení škůdců a plevely bez nutnosti vystavovat člověka těmto toxickým substancím. Pro naplánování trasy letu se využívají plánovače misí pracující za pomoci GPS souřadnic (viz Obr. 12).



Obrázek 12 – plánovač misí pro multikoptéru DJI Agras T30,
zdroj: <https://imgur.com/hvOqFcl>

¹⁹ **precizní zemědělství** – data získaná z dronu přináší zemědělcům znalosti o pozemku, načež může přistupovat k jeho částem individuálně a vykonávat zde potřebné úkony (aplikace hnojiva, postřik atd.)

Výsadba – zemědělství je obecně časově intenzivní oblast, je tedy zapotřebí, aby většina zkušenosti nevyžadujících prací byla přesunuta na stroje. Mezi novější projekty spadá možnost autonomní sadby pomocí dronů. V dnešní době se většina z nich nachází v lesním průmyslu a primárně se využívá k výsadbě stromů. Benefitem je opět úspora pracovní síly a snadnější přístup do těžce přístupných oblastí.

Let je opět naplánován předem pomocí plánovače misí a následně nahrán do paměti letové jednotky dronu. Při plnění mise dron na základě časového úseku vystřeluje sazenice zabalené v uhlíkových kapslích kolmo k zemi, čímž jsou zapuštěny do půdy. V rané fázi růstu je ochranná uhlíková kapsle rozložena. Tímto způsobem je možné zasadit několik desítek tisíc stromů denně. [22]

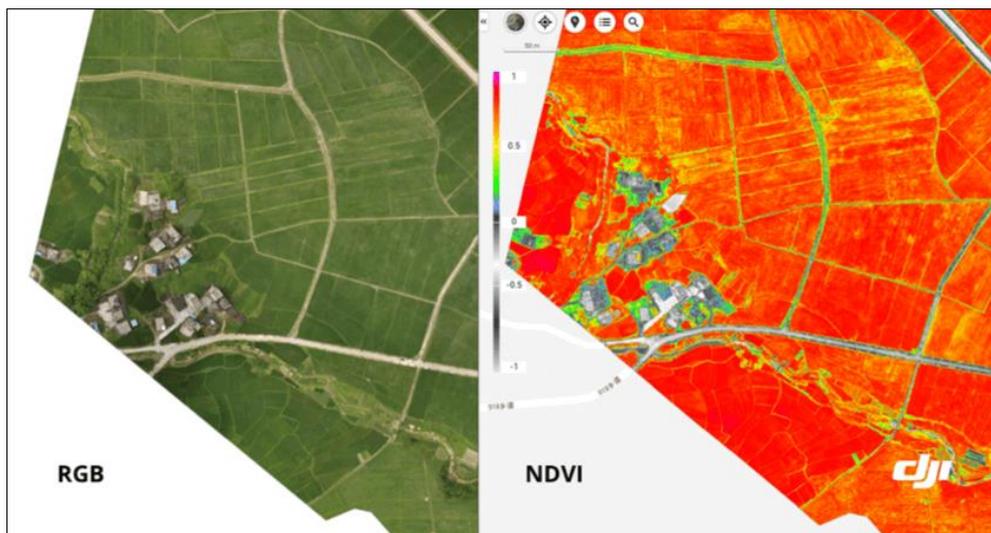
Sběr informací – autonomní sběr informací o půdě je důležitou činností, která dokáže odhalit veškeré detaily od kvality růstu po vyzařované teplo. Tyto údaje jsou typicky zachyceny pomocí **hyperspektrální**²⁰ a **RGB kamery**, které jsou na dronu osazeny. Pomocí těchto informací z kamer mohou být vytvořeny dvě základní **mapy půdy** a to:

- **RGB** – jedná se o základní typ mapy, která zachytává informace ve třísloužkovém barevném modelu. Primárně se využívají na monitorování úrody po delší dobu, a to i v řádu několika let.
- **NDVI** – z angl. *Normalized Difference Vegetation Index*, jedná se o typ mapy, který je vytvořen pomocí hyperspektrální kamery. Oproti RGB se jedná o detailnější záznam informací. Princip fungování spočívá v množství odraženého **NIR**²¹ světla od listů plodin, které jsou dronem při letu snímány.

Zdravé listy rostlin odráží mnohem více NIR světla nežli listy mrtvé. Oblasti s malou mírou odraženého světla jsou poté na mapě vyobrazeny červenou barvou (viz Obr. 13). [23]

²⁰ **hyperspektrální kamera** – kamera schopná dělit světelné spektrum na menší vlnová pásma

²¹ **NIR** – z angl. *near-infrared* označuje neviditelnou část spektra známou jako blízké infračervené světlo



Obrázek 13 – vizualizace výstupů RGB a NDVI map,

zdroj: [https://enterprise-insights.dji.com/hs-](https://enterprise-insights.dji.com/hs-fs/hubfs/Blog%20Images/Use%20of%20Drones%20in%20Agriculture%20Today/RGB%20vs%20NDVI.png?width=840&name=RGB%20vs%20NDVI.png)

[fs/hubfs/Blog%20Images/Use%20of%20Drones%20in%20Agriculture%20Today/RGB%20vs%20NDVI.png?width=840&name=RGB%20vs%20NDVI.png](https://enterprise-insights.dji.com/hs-fs/hubfs/Blog%20Images/Use%20of%20Drones%20in%20Agriculture%20Today/RGB%20vs%20NDVI.png?width=840&name=RGB%20vs%20NDVI.png)

Z obrázku je patrné, že stav na první pohled zdravě vypadající půdy může být po použití detailnějšího NDVI opačný. [22]

4.1.1 Aplikace algoritmů Random Forest a Support Vector Machines

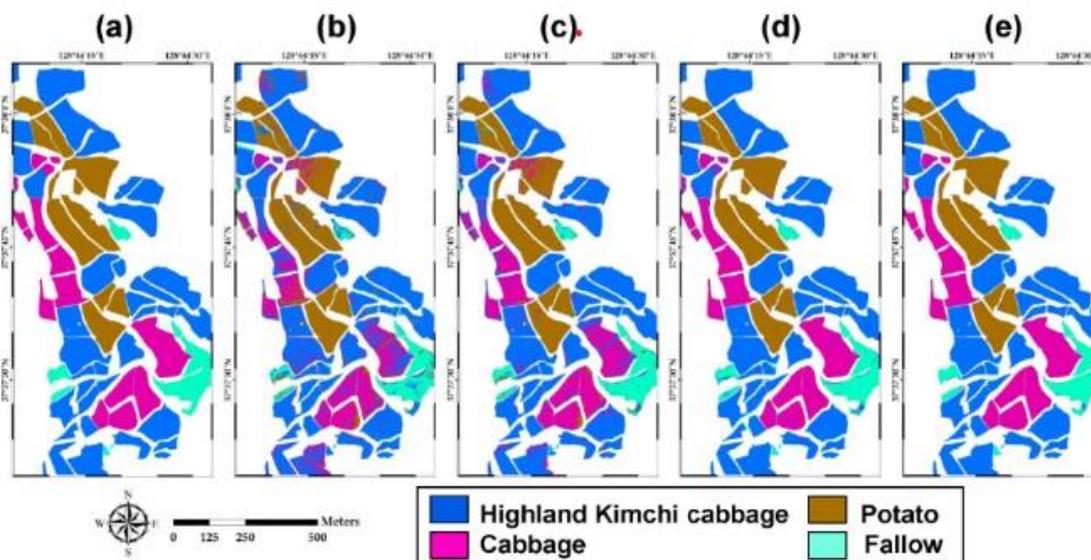
V březnu roku 2019 byla publikována studie pod názvem „*Impact of Texture Information on Crop Classification with Machine Learning and UAV Images* [24]“, zabývající se využitím UAV společně s algoritmy strojového učení za účelem klasifikace plodin. V této práci autoři využili algoritmů **náhodného lesa** a **metodu podpůrných vektorů** (viz Kap. 3.4.1).

Studie byla provedena v Anbandegi v Jižní Koreji, kde se často pěstují různé druhy plodin na relativně malých plochách. Hlavním cílem studie bylo klasifikovat plodiny na ploše o velikosti 42,5 hektaru. Proces vytvoření datasetu probíhal následovně:

Pevné křídlo, jakožto agent byl ovládán pomocí GPS a plánovače misí. Po čas plnění mise byla půda snímána pomocí kamery **Cannon S110**, která umožňuje zaznamenávat snímky pomocí NIR. Z tohoto důvodu je vhodná pro vytváření **hyperspektrálních dat**, která jsou dále zpracovávána. Celkem bylo provedeno šest misí v období čtyř měsíců pro zachycení snímků v různých časových úsecích.

Celkem bylo zaznamenáno okolo **7 miliónů pixelů dat**, kdy 20 000 pixelů bylo vybráno jako trénovací data pro supervised learning, zbytek sloužil jako data referenční. Pro jejich klasifikaci byl využit učící algoritmus **náhodného lesa** (RF) společně s **metodou podpůrných vektorů** (SVM). Algoritmus náhodného lesa byl vytvořen pro klasifikaci dat do více kategorií (stromů). Vstupem pro RF byl kromě datasetu také počet stromů a uzlů. Z důvodu minimalizace ztrátové funkce byl počet stromů 150 a počet uzlů 12. Algoritmus využívající podpůrné vektory vytváří kategorie, do kterých jsou jednotlivá data řazena. Jako vstup SVM algoritmus využívá pouze datasetu. [24]

Pro minimalizaci datového šumu ve výsledcích klasifikace byly využity textury, které byly aplikovány na obrázek převedený do stupňů šedi. Obrázek v této podobě je poté přeměněn na matici, kde každý pixel udává svoji hodnotu jasu. V této studii jsou využity tři základní velikosti těchto matic a to: 3x3, 15x15 a 31x31. Samotné klasifikační algoritmy byly implementovány v **programovacím jazyce R**, kde byla využita knihovna **randomForest** pro náhodný les a **e1071** pro SVM. Výsledky klasifikačních algoritmů byly vizualizovány v softwaru ENVI (viz Obr. 14).



Obrázek 14 – porovnání výstupů klasifikace ze SMV algoritmu a reálných geologických dat, zdroj: [24]
 vysvětlivky: (a) reálná geologická data, (b) Srpnový snímek s NIR, (c) Srpnový snímek s NIR a texturou 31x31, (d) sumarizace všech šesti snímání s NIR, (e) sumarizace šesti snímání s NIR a texturou 31x31

Z obrázku je patrné, že oproti reálným geologickým datům se v některých oblastech vyskytují dle SVM i plody jiné, což vizualizuje přesnost algoritmu. Kompletní přesnost těchto dvou algoritmů byla spočtena porovnáním klasifikačních výsledků s množstvím referenčních dat, která nebyla využita pro trénování. Přesnost algoritmu SVM byla oproti RF v průměru o 2% vyšší. [24]

4.2 Logistická oblast

Velice diskutovaným tématem v dnešní době je také využití autonomních dronů v oblasti logistiky. Mezi základní činnosti, které mohou drony v logistice plnit náleží: **doručování balíků, inspekce** ale i **správa skladového hospodářství**.

Hlavním důvodem expanze dronů v tomto odvětví je cenová úspora, a to zejména při doručování balíků. V posledním desetiletí vznikla řada firem specializující se pouze na tuto činnost. Významným zástupcem je irská doručovací firma **Manna**, o které se na portále *forbes.com* nachází článek²² [25]

Redaktor J. Koetsier (2021) udává, že: „*Manna provádí 2 000 až 3 000 letů denně pomocí plně autonomních dronů velikosti kufru, které létají rychlostí 50 mil za hodinu – což je v Irsku 80 km/h – ve výšce 150 až 200 stop. V průběhu dodávky balíčku dron prohledá oblast pomocí LiDARu a radaru, aby našel bezpečné místo, sestoupí, vyloží vaši dodávku a odletí zpět pro další. Každý dron je schopen dodat sedm až osm dodávek za hodinu.*“ (překlad vlastní)

Dle dostupných informací, doručení zásilky dronem stojí pouze 3–5 dolarů, což je v porovnání s ostatními doručovacími metodami vysoce úsporné řešení.

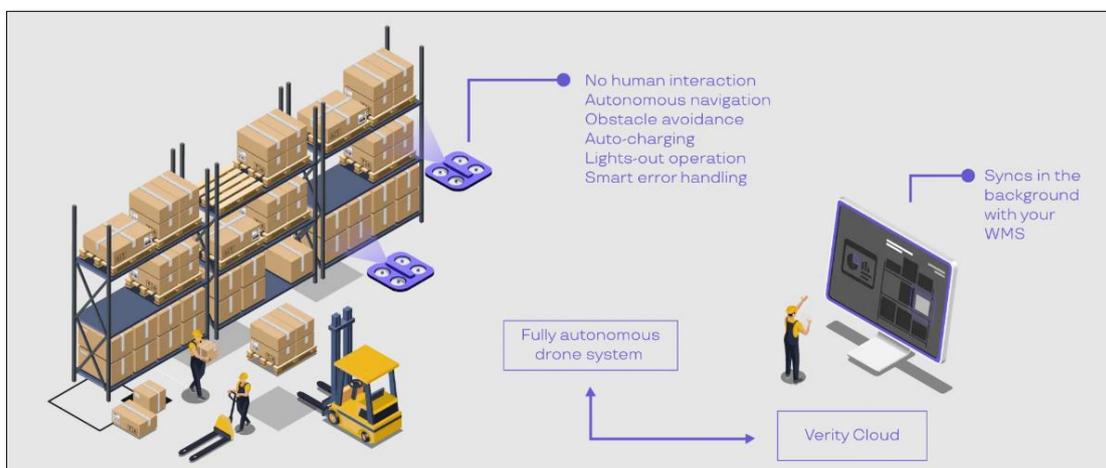
S nárůstem možnosti obchodování přes internet se předpokládá, že do roku 2030 vzroste počet doručovacích vozidel až o 36 %. Tento fakt bude mít za následek zablokování dopravy a tím i zpomalení pozemních dodávek, čímž bude poptávka po leteckém doručování vyšší.

²² <https://www.forbes.com/sites/johnkoetsier/2021/08/18/drone-delivery-is-live-today-and-its-90-cheaper-than-car-based-services/?sh=bf39dc54d020>

Neméně důležitým faktorem tohoto způsobu doručování je také snížení emitovaných plynů. Studie²³, která byla provedena společností **RSG** v roce 2020 potvrdila, že běžná doručovací vozidla emitují 26–28x více plynů nežli doručovací drony. [25]

S těmito výhodami se ale pojí i řada nevýhod, mezi ty základní náleží: **vysoká vstupní investice, omezení letu v nepříznivém počasí, regulace letových práv v různých státech**. Doručování pomocí dronů se stalo populárním v době pandemie Covid-19, kdy byly např. využívány pro přepravu léků v těžce přístupných lokacích Rwandy.

Mimo doručování balíků se autonomní drony využívají i ve skladovém hospodářství, kde spravují inventář. Nejčastější aplikací je skenování palet, kdy dron prolétává nad nimi a pomocí čtečky provádí skenování. Data skenu jsou poté odeslána na cloud, běžně ve formátu CSV, kde mohou být dále zpracována. Tímto způsobem je možné přesunout běžné skladové činnosti do prostředí kanceláře. Kompletní proces fungování chytrého skladu (viz Obr. 15). [25]



Obrázek 15 – kompletní proces fungování chytrého skladu s využitím dronů,
zdroj: <https://assets2.verity.net/app/uploads/2022/03/01165845/Solutions-Graphic-in-color-01-01.png?strip=all&lossy=1&resize=1920%2C808&ssl=1>

²³ <https://rsginc.com/insights/calculating-the-climate-cost-of-drone-delivery/>

4.2.1 Aplikace algoritmu Q-Learning

V roce 2019 byla publikována studie pod názvem „*Drone Navigation and Avoidance of Obstacles Through Deep Reinforcement Learning* [26]“, která poukazuje na využití algoritmu zpětnovazebního učení pro navigaci dronu v simulovaném prostředí, vyhnutí překážkám a úspěšného dosažení cíle. Autor v této práci využil algoritmu **Q-Learning** (viz Kap. 3.4.4), který je možné použít i bez znalosti prostředí, ve kterém se agent nachází. Pro simulaci autoři využili simulátor **AirSim**, což je softwarová platforma pro provádění experimentů se strojovým učením. Pozice dronu je určena na základě geofencingu²⁴, kdy je vytyčen perimetr pro zamezení úniku dronu z definovaného letového území.

Agent jakožto multikoptéra se pohybuje v prostředí vytvořeném simulátorem a získává z něho při každém časovém kroku následující data:

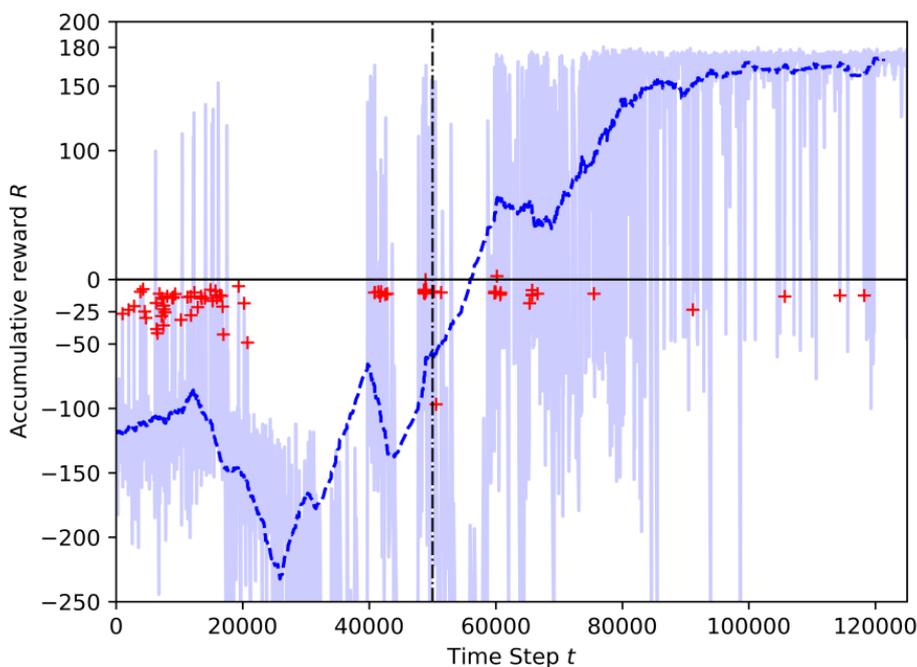
- $v_x v_y$ (rychlost agenta na osách x a y)
- $d_x d_y d_t$ (vzdálenost agenta od cíle v osách x, y a celkem)
- $dg_{xmin} dg_{xmax} dg_{ymin} dg_{ymax}$ (agentova vzdálenost do GPS omezení)
- ψ (úhel vybočení k počáteční orientaci)
- **DepthImage** (hloubka obrazu)
- **Arrived** (booleovské informace o přistání)
- **Collided** (booleovské informace o kolizi)

V každém stavu agenta se nachází skalární hodnoty společně se vstupními obrázky, které jsou zpracovávány pomocí neuronové sítě, která je spojuje do jediného toku, který se nazývá **Join Neural Network** (JNN). V praxi toto označení znamená trénování jediné neuronové sítě na více úlohách zároveň. Obrázky jsou vstupem do konvoluční neuronové sítě (viz Kap. 3.3.3), načež její výstupy jsou opět spojeny se skalárními hodnotami stavu agenta. [26]

V práci je nastavena fixní výška letu dronu společně s možností kolize, která může vzniknout pouze v osách x a y. Výstupem z architektury JNN jsou poté možnosti pohybu po následujících osách: $(-v_x, -v_y, +v_x, +v_y)$ při rychlosti 0,5 m/s a nulová funkce.

²⁴ **geofencing** – virtuální perimetr vytyčený pomocí GPS souřadnic

Funkce odměny je zde definována ziskem 100 bodů za dosažení cíle, ztrátou 100 bodů za kolizi s překážkou či perimetrem geofencingu a ztráta 10 bodů za provedení kolize s dronem. Trénování probíhalo přímo v simulaci za pomoci dvou dronů, které se pohybovaly náhodně po prostředí. Kompletní graf průběhu trénování (viz Obr. 16). [26]



Obrázek 16 – graf výše odměny v závislosti na počtu kroků trénování, zdroj: [26]

Jak je již z grafu patrné, při nárůstu časových kroků (t) se zvedá i kumulativní odměna R . Na průběhu grafu je zřetelně vidět, že přes polovinu celkových kolizí proběhlo před dosažením 20 000 kroků. Po tomto milníku učící dron začíná hledat nové cesty v prostředí a aktivně se vyhýbá dvěma náhodným dronům. Kolem 50 000 kroků jsou zaznamenány další kolize, nicméně další trénování již probíhá s minimálními chybami. Okolo 120 000 kroků je patrné, že agent se již dále bude pohybovat v prostředí nejspíše bez kolizí.

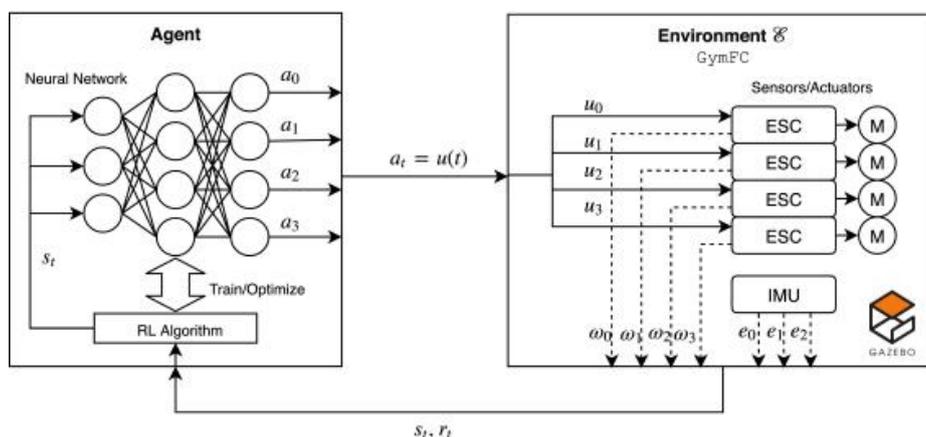
Studie na závěr uvádí, že finální testy po trénování neuronové sítě byly provedeny na **100 epochách**, kdy při každé z nich agent úspěšně dosáhl určeného cíle. [26]

4.3 Kompetitivní závody

Autonomní drony nemusí sloužit pouze k účelům pracovním či výpomocným, je možné na ně pohlížet také z hlediska zábavy a kompetitivního sportu. V roce 2015 byla oficiálně založena liga závodních dronů pod názvem **DRL**²⁵, kde profesionální piloti závodí se speciálně upravenými kvadrokoptéry na trojrozměrných tratích s brankami při rychlosti až 140 km/h. Tento typ dronů je ovládán plně manuálně na stovky metrů pomocí FPV systému (viz Kap. 5.7).

S postupným vývojem letových jednotek se rozšířila možnost implementace strojového učení a počítačového vidění do dronů. V roce 2019 byl představen první plně autonomní závodní dron od DRL pod názvem **RacerAI**. Nyní se každoročně v Orlando koná oficiální závodní liga autonomních dronů AIRR²⁶. V této lize 11 nejlepších týmů usiluje o naprogramování RacerAI kvadrokoptéry tak, aby zvládla autonomně absolvovat trasu v co nejkratším čase bez využití GPS či jakékoliv lidské intervence. Odměnou za první místo je částka 1 milion dolarů.

Jak je již patrné, tento typ závodů testuje mechanické i elektrické komponenty dronů za hranice jejich limitů. Navigace agenta po trati probíhá pomocí senzorů či kamer, které jsou často kombinovány s **IMU**²⁷.



Obrázek 17 – princip trénování letové jednotky pomocí senzorů za pomoci zpětnovazebního učení v prostředí GymFC a simulátoru Gazebo,
zdroj: <https://dl.acm.org/cms/attachment/712dc82f-1393-4087-93f9-0d4c37454887/tcps0302-22-f02.jpg>

²⁵ **DRL** – Drone Racing League (v překladu liga závodních dronů)

²⁶ **AIRR** – Artificial Intelligence Robotic Racing (v překladu robotické závody s umělou inteligencí)

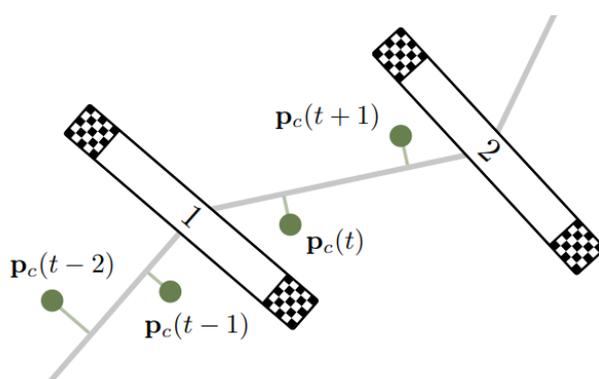
²⁷ **IMU** – inerciální měřicí jednotka, určuje orientaci a pohyb v prostoru (gyroskop + akcelerometr)

Z obrázku je patrné, že při každém časovém kroku (t) agent získá z prostředí data z IMU (e_1, e_2, e_3), jakožto **chybovou odchylku úhlové rychlosti**. Dále je z prostředí předána **úhlová rychlost** každého motoru ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$). Dalšími možnými předanými daty mohou být také vstupy z kamery, nicméně se na předchozím obrázku tato data nepředávají. Po předání těchto dat do neuronové sítě agent spustí sadu akcí (a_t), za kterou získá numerickou odměnu (r_t), která udává výkonnost provedených akcí. Spuštěná sada akcí je poté odeslána zpět do ESC²⁸, kdy každé z nich obhospodařuje daný motor. Komunikace agenta a prostředí se obecně nazývá **Markovův rozhodovací proces** (viz Kap. 3.4.4). [27]

4.3.1 Aplikace algoritmu Proximal Policy Optimization

V roce 2021 byla publikována studie pod názvem „*Autonomous Drone Racing with Deep Reinforcement Learning* [28]“. Autoři této práce vytvořili tři závodní dráhy (*AlphaPilot, Split-S a AirSim*) pro možnost trénování neuronové sítě. Jednotlivé trasy byly vytyčeny pomocí závodních branek, kdy autoři řešili problém autonomního letu mezi nimi. Cílem studie bylo nalezení nejefektivnější a nejrychlejší cesty mezi jednotlivými brankami.

Agent zde využívá zkušenosti získané z minulého letu a mění dle nich své strategie. V praxi je poté prováděno několik tisíc takových průletů (iterací) za účelem učení, kdy za každý průlet získává agent odměnu (viz Obr. 18).



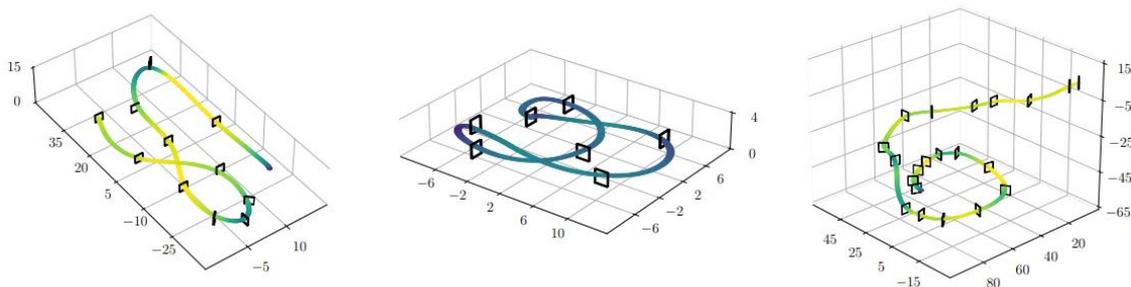
Obrázek 18 – funkce odměny při průletu brankou, zdroj: [28]

²⁸ ESC – zařízení, které reguluje otáčky (RPM) jednotlivých motorů na základě příkazů z letové jednotky

V projektu se také objevuje bezpečnostní odměna, která redukuje risk nehody dronu v letu.

Samotné trénování agenta probíhá pomocí algoritmu **Proximal Policy Optimization (PPO)**. Tento algoritmus je využíván v oblasti zpětnovazebního učení a deep learningu neuronových sítí. Strategie samotného učení spočívá v prvotním zaučení agenta v simulátoru (Flightmare), kde agent prolétává branky v minimální rychlosti, která se následně zvyšuje úměrně se zkušenostmi, které již získal.

V této fázi autoři implementovali několik experimentů, ve kterých využívají Flightmare simulátor společně s **OpenAI**²⁹. Prvním z nich bylo otestování jejich metody implementace na třech již zmíněných trasách, kdy každá z nich představuje pro autonomní dron jinou překážku. Trasa **AlphaPilot** představuje dlouhé rovinky s prudkými zatáčkami, **AirSim** umožňuje testování prudkých zatáček se změnou výšky a **Split-S** oplývá dvěma brankami umístěnými nad sebou (viz Obr. 19). [28]



Obrázek 19 – vizualizace třech závodních drah, vysvětlivky: zleva (AlphaPilot, Split-S, AirSim), zdroj: [28]

Na tyto tři trasy byly použity tři rozdílné algoritmy strojového učení, metoda autorů (PPO), **Polynomial Minimum-Snap Trajectory** a **Optimization-Based Time-Optimal Trajectory** algoritmy. Průměrná rychlost letu byla okolo 60 km/h.

Výsledek letového experimentu (viz Tabulka 10).

²⁹ **OpenAI** – open-source platforma pro vývoj produktů s využitím umělé inteligence

Tabulka 10 – Výsledek letového experimentu na třech závodních trasách, zdroj: [28]

Metoda	AlphaPilot (s)	Split-S (s)	AirSim (s)
<i>Polynomiální</i>	12,23	15,13	23,82
<i>Optimalizační</i>	8,06	6,18	11,40
<i>PPO</i>	8,14	6,50	11,82

Z tabulky je patrné, že řešení autorů za pomoci algoritmu PPO bylo poměrně efektivní, nicméně Optimalizační algoritmus plánování trajektorie byl lehce rychlejší na všech třech trasách. Další provedené experimenty se zaměřují na *upravení letové trajektorie dronu při náhlé změně trasy či závodění na náhodně vygenerovaných trasách.*

Výstupem a zároveň čtvrtým provedeným experimentem je aplikace tohoto řešení do reálného světa, kde byl zkonstruován 5“ autonomní dron, do kterého byly implementovány již naučené vědomosti. Pomocí nich byl dron schopen absolvovat trať AlphaPilot s průměrnou rychlostí **17 m/s** bez jediné chyby. [28]

4.4 Bezpečnostní monitoring

Bezpečnostní monitoring označuje aktivitu přímého sledování osob, chování, budov či jiných střežených objektů za účelem správy, řízení nebo ochrany. V praxi se již můžeme setkat s mnoha sledovacími zařízeními, nejčastější z nich je však bezpečnostní kamera. Tyto kamery, které jsou instalovány na vhodná místa pro zajištění maximálního rozhledu, mají limitovaný úhel snímání a je poměrně snadné je v případě vniknutí vyřadit z provozu. [29]

Tento problém je možné vyřešit s využitím autonomních dronů, které nabízejí možnost provádět jednodušší i levnější **sběr obrazových dat** vzdáleně, a to i z velké výšky. Tato data jsou poté předána operátorovi dronu či vyhodnocena pomocí neuronové sítě. V případě vyhodnocení hrozby jsou poté provedeny příslušné úkony. Tento způsob monitoringu také výrazně snižuje náklady na dohledové pracovníky. Malá velikost dronů umožňuje provádět monitoring v těžce přístupných lokacích a pořídít tak záběry z první osoby, které by bylo nemožné získat manuálně.

Drony určené pro tento účel jsou zpravidla osazeny různými typy senzorů, pro provádění monitoringu nezávisle na denní době. Mezi základní se řadí: **infračervená kamera, kamera s živým přenosem (FPV systém) a kamera s nočním či termálním viděním** a zejména **LiDAR** (viz Kap. 5.8.6). [29]

S využitím těchto technologií se bezpečnostní drony používají k různým činnostem, přehled těch nejrozšířenějších (viz Tabulka 11).

Tabulka 11 – Nejrozšířenější oblasti využití bezpečnostních dronů, zdroj: autor

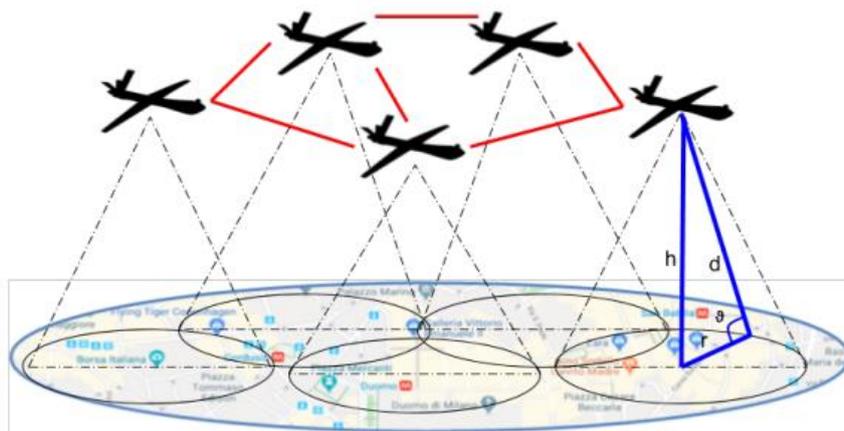
Typ využití	Místo určení	Předmět monitoringu	Využívaná architektura
<i>Taktické</i>	<i>Dálnice, hraniční přechody</i>	<i>Pašování, ilegální přechod</i>	<i>Pevné křídlo</i>
	<i>Stavební plochy, lesy, budovy</i>	<i>Kvalita práce, krádeže</i>	<i>Multikoptéra</i>
<i>Průmyslové</i>	<i>Trasa ropovodu</i>	<i>Sabotáž ropovodu, krádeže</i>	<i>Pevné křídlo</i>
<i>Námořní</i>	<i>Luxusní jachty</i>	<i>Piráctví, rabování</i>	
<i>Pytláctví</i>	<i>Přirozená prostředí</i>	<i>Ilegální lov zvěře</i>	
<i>Eventové</i>	<i>Veřejné události</i>	<i>Bezpečí účastníků</i>	<i>Multikoptéra</i>
<i>Řízení provozu</i>	<i>Křižovatky, silnice</i>	<i>Provoz dopravy, kolize</i>	
<i>Zvláštní jednotky</i>	<i>Krizová situace</i>	<i>Letecká asistence</i>	

Většina bezpečnostních dronů využívá k navigaci po trase **GPS waypointy** společně s **plánovačem misí**. Z důvodu pokrytí zpravidla rozsáhlých ploch jsou využívána pevná křídla, která jsou schopna až několika hodinového letu. [30]

Pro případ detailnějšího pokrytí rozsáhle plochy bezpečnostními drony se využívají tzv. **swarm systémy** (v překladu roj). Jak již název napovídá, tento systém se skládá z jednotlivých **decentralizovaných zařízení**, která spolu kooperují a dokážou společně vykonávat určitou činnost koordinovaně.

Podobnost s těmito systémy je možné nalézt např. v přírodě, kde určitý hmyz provádí koordinovaný let.

Jedná se také o významnou oblast **multiagentních systémů (MAS)**. Tyto systémy můžeme aplikovat i na bezpečnostní drony, kdy se každý z nich chová jako **autonomní agent**, který se nachází v prostředí. Při letu spolu všichni komunikují, což jim umožňuje provádět akce koordinovaně, nicméně musí být zamezeno případné kolizi pomocí vhodného algoritmu (viz Obr. 20).



Obrázek 20 – let roje dronů provádějící bezpečnostní monitoring,
zdroj: https://www.mdpi.com/electronics/electronics-09-00543/article_deploy/html/images/electronics-09-00543-g001-550.jpg

4.4.1 Aplikace algoritmu Optimization-Based Decision-Making

V listopadu roku 2022 byla publikována studie pod názvem „*A Multi-Agent System Using Decentralized Decision-Making Techniques for Area Surveillance and Intruder Monitoring* [31]“, která se zaměřovala na aplikaci **roje dronů** pro monitorování oblasti a odhalování vetřelců. Hlavním cílem studie bylo určit účinnost zmíněného rozhodovacího algoritmu oproti stavu, kdy se agent rozhoduje zcela náhodně.

Agenti se pohybují v roji (swarmu) a monitorují stav prostředí, ve kterém nevědí, zda se vetřelec nachází či nikoliv. Na začátku simulace jsou **dva vetřelci** rozmístěni v prostředí, přičemž každých 10 sekund se zrodí dva další. V případě zachycení snímáním je vetřelec odstraněn. Pokud však dosáhne cíle, musí na daném místě setrvat 10 sekund a následně je ze simulace také odstraněn. [31]

Klíčovým algoritmem této studie je **Optimization-Based Decision-Making (OBDM)**, který pro své fungování využívá **Markovův rozhodovací proces** (viz Kap. 3.4.4). Tento algoritmus určuje následné kroky agenta a zadává mu úkoly, které jsou vybírány z velkého množství možných úloh. Z hlediska multiagentních systémů jsou úlohy pro jednotlivé agenty vybírány na úrovni systému, kdy jsou upřednostněna taková rozhodnutí, která budou mít prospěch pro celý systém.

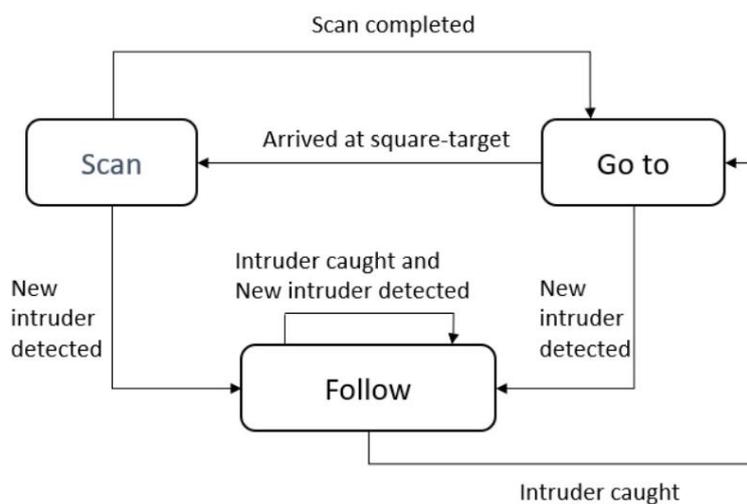
Při letu je využita kamera, která snímá prostor ve tvaru čtverce přímo kolmo pod dronem. Výpočet šířky a výšky snímacího čtverce (FOV)³⁰ je ve studii proveden následovně:

$$výška_{fov} = 2 \cdot výškaLetu \cdot \tan\left(\frac{fov \text{ vertikálního úhlu}}{2}\right)$$

$$šířka_{fov} = 2 \cdot výškaLetu \cdot \tan\left(\frac{fov \text{ horizontálního úhlu}}{2}\right)$$

V případě simulace byla letová výška nastavena na 20 m, přičemž FOV vertikálního úhlu bylo 0,785 radiánů a úhlu horizontálního 1,047. Po provedeném výpočtu byl vytyčen snímací čtverec o velikosti 23x16,6 m. [31]

Kompletní průběh monitoringu prostředí a přechod mezi jednotlivými stavy (viz Obr. 21).



Obrázek 21 – stavový diagram multiagentního bezpečnostního systému, zdroj: [31]

³⁰ **FOV** – z angl. *Field of View*, označení pro velikost snímané plochy

Z důvodu validace bylo vytvořeno celkem **šest scénářů** v robotickém frameworku **ROS**, simulace byla provedena v simulačním programu **Gazebo**. Plánování letové mise bylo vytvořeno za pomoci firmwaru letové jednotky **PX4**.

Parametry každého experimentu společně s aplikací algoritmů a výsledky (viz Tabulka 12).

Tabulka 12 – Výsledky časů jednotlivých scénářů s parametry, zdroj: [31]

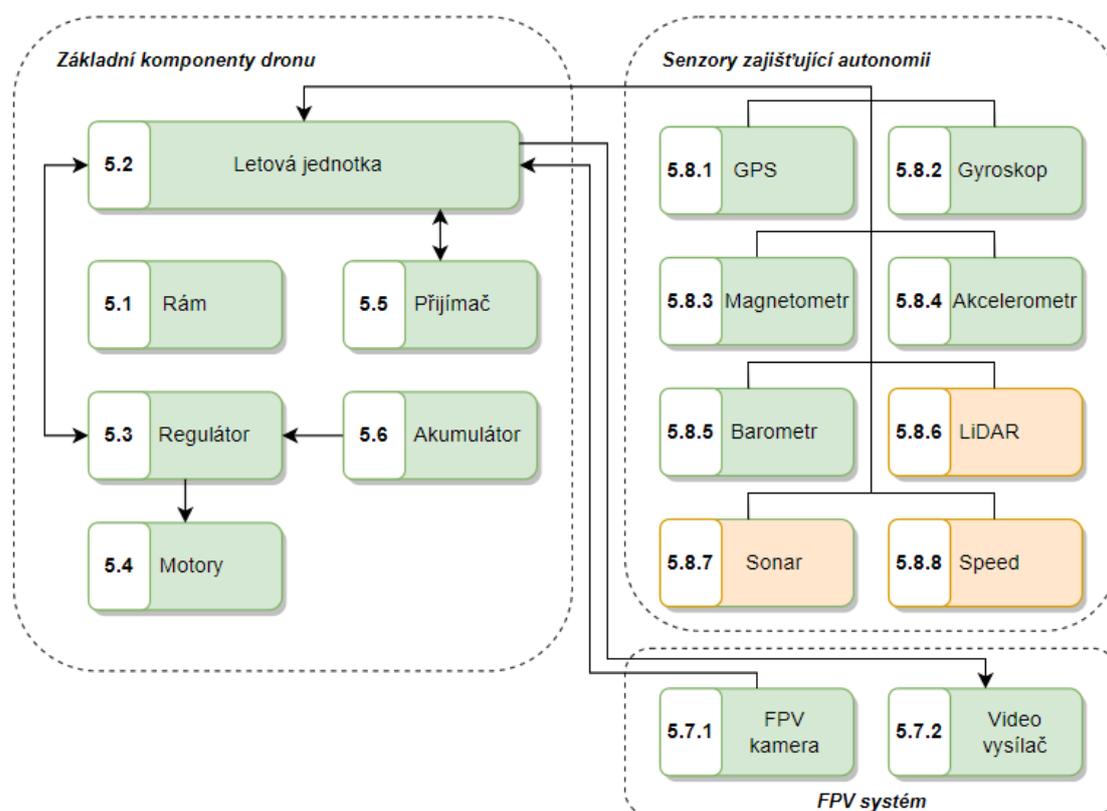
Set 1	Scénář 1	Scénář 2	Scénář 3
<i>Velikost světa</i>	<i>100 x 100 m</i>	<i>140 x 140 m</i>	<i>200 x 200 m</i>
<i>Velikost snímacího č.</i>	<i>10 x 10</i>	<i>14 x 14</i>	<i>20 x 20</i>
<i>Velikost swarmu</i>	<i>4</i>	<i>8</i>	<i>16</i>
<i>Rychlost vetřelců</i>	<i>0,28 m/s</i>	<i>0,39 m/s</i>	<i>0,56 m/s</i>
Set 2	Scénář 4	Scénář 5	Scénář 6
<i>Velikost světa</i>	<i>150 x 150 m</i>	<i>210 x 210 m</i>	<i>300 x 300 m</i>
<i>Velikost snímacího č.</i>	<i>15 x 15</i>	<i>21 x 21</i>	<i>30 x 30</i>
<i>Velikost swarmu</i>	<i>4</i>	<i>8</i>	<i>16</i>
<i>Rychlost vetřelců</i>	<i>0,42 m/s</i>	<i>0,59 m/s</i>	<i>0,84 m/s</i>
<i>Výsledky nalezení všech vetřelců v jednotlivých scénářích (ukončení simulace) v sekundách</i>			
<i>Řízené rozhodování – OBDM algoritmus</i>	<i>40,9</i>	<i>33,8</i>	<i>38,7</i>
	<i>46,7</i>	<i>44,4</i>	<i>53,8</i>
<i>Náhodné rozhodování</i>	<i>71,2</i>	<i>63,4</i>	<i>66,7</i>
	<i>75,4</i>	<i>75,8</i>	<i>93,6</i>

Z tabulky je patrné, že efektivita algoritmu OBDM pro řízené rozhodování dosáhla lepších výsledků při nalezení všech vetřelců v každém scénáři. Výsledky se řádově odlišují o několik desítek vteřin, což jen potvrzuje efektivitu použitého rozhodovacího algoritmu.

5 Technická analýza autonomní FPV kvadrokoptéry

V následujících kapitolách budou stručně rozebrány jednotlivé komponenty autonomního dronu. V případě zájmu o získání detailnější specifikace každé z nich je zde uveden odkaz na autorovu bakalářskou práci pod názvem „*Technická analýza návrhu a konstrukce FPV kvadrokoptéry s využitím částí vyrobených 3D tiskem*“³¹.

Kromě základních letových komponentů zde bude rozebráno i rozšíření o **FPV systém** společně se **senzory pro zajištění autonomie** kvadrokoptéry. Obě tato rozšíření budou aplikována v praktické části práce. Z důvodu komplexity technické analýzy byl vytvořen klasifikační diagram se znázorněním komunikace jednotlivých komponentů (viz Obr. 22).



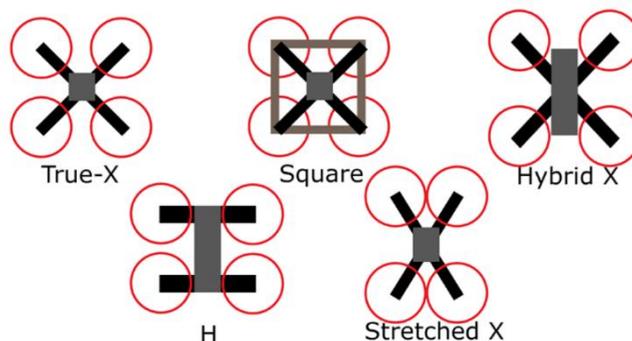
Obrázek 22 – klasifikační diagram se znázorněním komunikace všech komponentů podporovaných firmwarem iNav, vysvětlivky: **použito v praktické části**, **nepoužito v praktické části**, zdroj: autor

³¹ <https://theses.cz/id/u9mza2/>

5.1 Rám

Hlavní funkcí rámu je ochrana elektronických komponentů kvadrokoptéry. Z tohoto důvodu jsou rámy vyráběny z pevných materiálů, a to zejména z **karbonových vláken**. Tento materiál je volen z důvodu cenové nenáročnosti, relativně malé hmotnosti i odolnosti v případě prudkého nárazu ve vysoké rychlosti. Naopak nevýhodou karbonu je vysoká míra vodivosti, kdy může dojít ke zkratu a zničení součástek.

Vnitřní součástky dronu jsou poměrně finančně náročné, proto je nutné volit pro jejich ochranu rámy co možná nejkvalitnější. Typicky se skládají ze **čtyř ramen, vrchní a spodní podstavy a sloupků se šroubky**. Obecně všechny architektonicky připomínají písmeno X v různých variantách (viz Obr. 23). [32]



Obrázek 23 – vizualizace nejpoužívanějších architektur rámu, zdroj: <https://www.dronmarket.com/class/INNOVAEditor/assets/1aa200s/aa11/aaaa.PNG>

V dnešní době se na trhu nachází několik typů rámu, kdy jejich velikost je označována v palcích, mezi nejčastěji používané rozměry náleží:

- | | | |
|----------------------------|------------|-------------------|
| • Třípalcové (3") | 120–150 mm | 2,5-3 mm tloušťka |
| • Čtyřpalcové (4") | 150–180 mm | 3-4 mm tloušťka |
| • Pětipalcové (5") | 180–220 mm | 5 mm tloušťka |
| • Sedmipalcové (7") | 280+ mm | 6+ mm tloušťka |

Při výběru rámu záleží na jeho využití. Pro sportovní účely se volí zpravidla rámy s aerodynamickými rysy (úzká ramena, menší hmotnost). Z hlediska logistiky, zabezpečení či zemědělské činnosti jsou voleny rámy větších rozměrů z důvodu jejich osazení přídatnými komponenty (kamery, rozprašovače atd.)

Rám využitý v praktické části práce se specifikacemi (viz Kap. 6.1).

5.2 Letová jednotka

Letová jednotka (dále jen „FC“), je ve světě dronů označována jako základní součástka, která podobně jako procesor v počítači vykonává instrukce na základě vstupů ze senzorů. V podstatě se jedná o **obvodovou desku**, která je osazena integrovanými senzory a to nejčastěji:

- | | |
|--|-----------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• Gyroskop (viz Kap. 5.8.2)• Akcelerometr (viz Kap. 5.8.4)• Barometr (viz Kap. 5.8.5)• Magnetometr (viz Kap. 5.8.3) | <i>Inerciální měřící jednotka</i> |
|--|-----------------------------------|

S využitím těchto vstupů může FC kontrolovat **rychlost motorů** a korigovat tak směr letu kvadrokoptéry. Většina komponentů kvadrokoptéry je s FC v přímém kontaktu a jejich komunikace mezi sebou probíhá právě přes ní.

Pro plnou funkčnost FC je nutné provést nejprve flashování firmwaru. Pro účely autonomního letu byl roku 2016 vydán open-source firmware **iNav**, který se zaměřuje zejména na autonomní let pomocí **GPS** a **plánovače misí**. Pomocí něj je také možné FC konfigurovat prostřednictvím **CLI konzole**. [33]

Konfiguraci FC v prostředí iNav zahrnuje:

- Kalibraci senzorů
- Nastavení portů komunikace UART³²
- PID kalibraci
- Nastavení AUX kanálů³³ a přijímače
- Zprovoznění FPV systému

Kompletní průběh konfigurace bude rozebrán v praktické části práce (viz Kap. 7). Podobně jako u rámců je velikost letové jednotky důležitým faktorem při výběru. Postupem času se letové jednotky rozvíjely a postupně zmenšovaly, kompletní evoluce FC (viz Tabulka 13).

³² **UART** – z angl. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, označuje hardwarové rozhraní, které umožňuje připojení periferních zařízení k letové jednotce

³³ **AUX kanál** – označuje vysílací kanál, ke kterému je možné přiřadit libovolné funkce (plyn, arm atd.)

Tabulka 13 – Evoluce vývoje letových jednotek, vysvětlivky: **již nepodporované**, **plně podporované**, zdroj: autor

Rok vydání	2007	2011	2012	2014
Velikost	45x45 mm	30x30 mm	20x20 mm	16x16 mm
Mikrokontroler	STM32F1	STM32F3	STM32F4	STM32F7
Rychlost	72 MHz		168 MHz	216 MHz
Paměť	128 KB	256 KB	512 KB – 1 MB	
Funkce	FC	FC, ESC, PDB	FC, OSD, VTX	FC, RX, OSD, ESC, SD karta

Po provedení nastavení letové jednotky následované zkušebním letem může být využito tzv. **černé skříňky** pro zaznamenání dat o letu. Tento záznam může být proveden přímo do **flash paměti jednotky** nebo pomocí UART portu do přídavného integrovaného SD card loggeru.

Záznamy z letu jsou klíčovým prvkem při snaze o nalezení chyb při letu či zamezení oscilace. Nicméně nám také v případě autonomních dronů poskytují možnost zmapovat kompletní let včetně chování senzorů, pozice letounu, rychlosti výšky atd. Posledním kritériem při výběru jednotky je způsob připojení periférií. V praxi se využívají zejména **pájecí plošky**, **JST kabely** či kombinace obou těchto řešení. [33]

Letová jednotka využitá v praktické části práce se specifikacemi:

Tabulka 14 – Specifikace letové jednotky, zdroj: autor, obr. [51]

Letová jednotka		Vizualizace
Značka	<i>iFlight</i>	
Název	<i>Succex-E F4 V2.1</i>	
MCU	<i>STM32F405</i>	
IMU	<i>MPU6000</i>	
Blackbox	<i>8 MB</i>	
Barometr	<i>BPM280</i>	

5.2.1 PID algoritmus

Jedná se o řídicí algoritmus, který je implementován přímo v letových jednotkách, kde přijímá vstupy ze senzorů dronu, z nichž následně vypočítá míru rychlosti otáčení jednotlivých motorů za účelem dosažení požadované rychlosti. Zpravidla platí, čím více je senzorů na multikoptěře, tím vyšší je její schopnost orientovat se v prostoru. [34]

Jak již název napovídá PID algoritmus se rozkládá na tři základní složky a to:

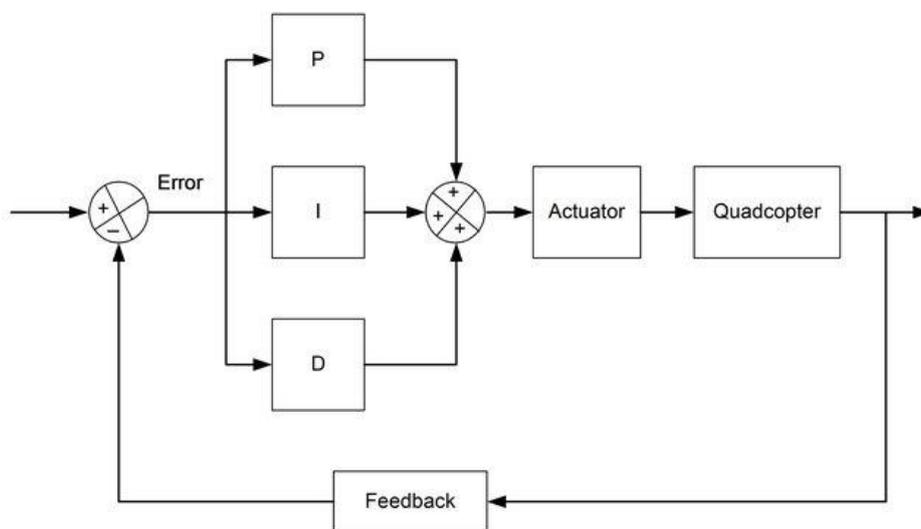
- **Proporcionální** – udává současnou chybu, hodnota P udává *míru responzivity chování*. Pokud je hodnota P vysoká, pak kvadrokoptéra provádí ostré pohyby, naopak při nižších hodnotách reaguje zpomaleně
- **Integrální** – udává minulou chybu, hodnota I udává *míru externích vlivů* např. silného větru, kdy usiluje o vyrovnaní centra gravitace kvadrokoptéry při letu. Pokud je hodnota I vysoká způsobuje oscilace, naopak při nižších hodnotách nedokáže udržet úhel letu, přičemž je nutný zásah pilota
- **Derivativní** – udává budoucí chybu, zpravidla je určena pro *utlumení hodnoty P* při chybném výpočtu kalkulace. Pokud je hodnota D nízká, způsobuje silné oscilace a tzv. propwash³⁴, vyšší hodnoty D mohou tento problém vyřešit. Nicméně příliš vysoké hodnoty způsobují přehřívání motorů a vibrace při letu

Jak již bylo řečeno algoritmus spočívá ve sledování vstupů ze senzorů či v případě manuálního ovládání vysílačky, obecně se tento vstup nazývá **set-point**, který je porovnáván s aktuálním měřením gyroskopu. Rozdílem těchto dvou hodnot vznikne **chyba**, kterou má za úkol právě PID algoritmus minimalizovat. [34]

Hledání takového nastavení, aby byla tato chyba co nejmenší, se nazývá **PID tuning** a je klíčovým faktorem pro zkvalitnění průběhu letu. Právě již zmíněným upravováním hodnot ve firmwaru uživatel determinuje míru dopadu, kterou algoritmus má na výstup, či jak bude FC reagovat na různé hodnoty. Každá oblast využití dronů bude mít nastavena jiná kritéria pro nalezení vhodných PID hodnot.

³⁴ **propwash** – označení pro let ve svém vzdušném víru, podobné turbulenci

PID algoritmus probíhá ve smyčce, proto je často označován jako PID control loop (viz Obr. 24).



Obrázek 24 – kontrolní smyčka PID algoritmu,
zdroj: <https://oscarliang.com/wp-content/uploads/2013/10/PID-quadcopter.jpg>

Oscar Liang (2022) udává, že: „Počínaje čtením dat ze senzorů PID kontrolérem, společně s kalkulací výstupů pro jednotlivé motory, se tento proces nazývá „kontrolní smyčka“. Čas, za který letová jednotka provede jeden průchod algoritmem se nazývá **looptime**. Tento čas může být měřen v milisekundách nebo častěji v Hz. Např. smyčka trvající 1 sekundu = 1 cyklus za sekundu = 1 Hz. Smyčka trvající 1 milisekundu (0,001 sekundy) = 1 kHz. Nejmodernější letové jednotky jsou schopné provést několik tisíc smyček za sekundu.“ (překlad vlastní) [34]

5.3 Regulátor

Regulátory (dále jen „ESC“), jsou určeny k řízení otáček jednotlivých motorů pomocí příkazů, které dostávají z letové jednotky. Tímto způsobem je umožněn pohyb kvadrokoptéry.

Na trhu se vyskytují tři základní varianty regulátorů a to samostatné, integrované do FC či **čtyři na jedné desce**, které jsou v kvadrokoptérách nejrozšířenější. Jak již bylo řečeno, letové jednotky mají určité rozměry, ve kterých jsou na trhu dostupné. To samé platí i o regulátorech, kdy musí být jejich rozměry s FC identické z důvodu montáže „nad sebe“. Klasický regulátor je propojen s FC a zároveň s motorem, kdy je určen jako jakýsi prostředník mezi nimi. Podobně jako

letové jednotky, také regulátory využívají určitý firmware pro zajištění správného fungování. Mezi nejrozšířenější patří **BLHeli_32** a **BLHeli_S**, nicméně v praxi jsou určeny pouze pro nastavení směru otáčení jednotlivých motorů. [35]

Mimo firmware hrají důležitou roli i použité protokoly, které mají za úkol předat instrukce z letové jednotky regulátorům pro zajištění bleskové odezvy na ovládání kvadrokoptéry. Mezi nejrozšířenější z nich řadíme:

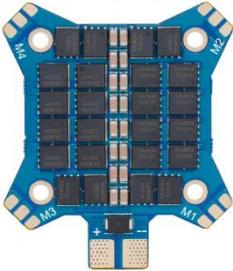
- **DShot** – digitální protokol, v případě použití není nutné provádět kalibraci ESC, rozšířený o následující funkce: pípání a určení směrů motorů. Protokol existuje v různých rychlostech, které jsou udávány v tisících bitů za sekundu: *DShot150, DShot300, DShot600, DShot1200*
- **Multishot** – vysokorychlostní analogový protokol, rychlejší než *DShot600*

Při výběru vhodného regulátoru musíme dbát na velikost motoru, který bude daný regulátor používat. Zpravidla platí, že čím větší motor, tím větší odběr proudu. Jednotkou elektrického proudu je ampér (A), kdy je možné zakoupit i regulátory využívající několik desítek ampérů. [35]

- **12A** – 3“ rámy, velikost motorů 1104–1108
- **20A** – 4“ rámy, velikost motorů 1404-2204
- **30A+** – 5“+ rámy, velikost motorů 2206–2408

Regulátor využitý v praktické části práce se specifikacemi:

Tabulka 15 – Specifikace regulátoru, zdroj: autor, obr. [52]

Regulátor		Vizualizace
Značka	<i>iFlight</i>	
Název	<i>SucceX-E 45A V2</i>	
Firmware	<i>BL_Heli_S</i>	
Proud	<i>45 A</i>	
Hmotnost	<i>15 gramů</i>	
<i>Způsob připojení k FC</i>		<i>osmi pinový JST kabel</i>

5.4 Motory

Jako hnací zařízení kvadrokoptéry se využívají **bezkartáčové motory** poháněné střídavým proudem, které jsou složeny ze dvou základních komponentů:

- **Stator** – skládá se z cívek a elektromagnetů, uprostřed statoru se nachází ložisko pro roztáčení rotoru, jedná se o stacionární část motoru
- **Rotor** – skládá se z permanentních magnetů a hřídele, která je pomocí statoru roztáčena, jedná se o pohyblivou část motoru

Princip fungování bezkartáčového motoru spočívá ve změně polarity elektromagnetů statoru, které se střídavě vypínají a zapínají, což dává do pohybu rotor. Bezkartáčové motory na trhu se prodávají pod různými označeními. Pro rozbor parametrů byl využit motor z praktické části práce:

iFlight XING-E Pro 2207 1800KV

Značka a název Průměr statoru Výška statoru Počet otáček/1V

Podobně jako u předchozích komponentů je velikost motoru spjata i s velikostí rámu. Pro 5" rámy se používají velikosti **2004-2208**, 4" rámy **1306-2004** a 3" rámy **1106-1407**. Zpravidla platí, že čím menší motory jsou, tím vyšší je hodnota **KV**, která udává počet provedených otáček na 1V. Např. při použití šesti článkové baterie s již zmíněným motorem by byl výpočet *RPM*: $1800 * 25,2 = 45\ 360$ **otáček/min** při plném výkonu, což má za následek rapidní úbytek napětí baterie. Z tohoto důvodu je nutné volit vhodné KV motorů pro danou oblast využití. [36]

Motor využitý v praktické části práce se specifikacemi:

Tabulka 16 – Specifikace motoru, zdroj: autor, obr. [53]

Motor		Vizualizace
Značka	iFlight	
Název	XING-E Pro	
Velikost	2207	
KV	1800	
Magnety	N52SH	
Způsob připojení k regulátoru		3x 150mm 20AWG kabel

5.5 Přijímač

Přijímač (dále jen „RX“) je základní komponentou obstarávající radiový přenos, kterým se předávají data z vysílačky (dále jen „TX“) do letové jednotky. Tento přenos probíhá zpravidla na frekvenci **2,4 GHz**, nicméně existují i signály operující na menších frekvencích, což rapidně zvyšuje dosah vysílání. V případě manuálního ovládání dronu jsou příkazy z TX posílány pomocí jednotlivých kanálů, kdy každý z nich představuje jeden povel pro dron. [37]

Z hlediska autonomie je manuální ovládání použito pouze pro zamezení kolize (není-li dron osazen potřebnými senzory). V případě použití **plánovače misí**, může být TX využito pouze jako kontrolní stanice, pro **spuštění mise**, zahájení RTH a failsafe či kontrolu **telemetrie**³⁵. Přijímače se rozlišují na základě počtu kanálů, s kterými dokážou pracovat. Zpravidla platí, že čím více kanálů, tím více funkcí může být implementováno. Na trhu se můžeme setkat se **čtyřmi, osmi i šestnácti** kanálovými přijímači. Přenos mezi TX a RX je poté zajištěn pomocí určitých protokolů:

- **PWM** (Pulse Width Modulation) – pro každý kanál je určen jeden vodič. V případě použití 16 kanálů by bylo nutné instalovat 16 kabelů (vodičů), což je z hlediska omezeného místa v kvadrokoptéře neefektivní
- **PPM** (Pulse Position Modulation) – vylepšený PWM protokol, který již dokáže po jednom vodiči vést vícero signálů, které jsou odesílány za sebou. Tento způsob přenosu může mít za následek vznik vysoké latence.
- **SBUS** (Serial BUS) – využívá sériovou komunikaci po **jednom vodiči**. Jedná se proto o vysoce efektivní řešení

Při prvním použití RX je nutné ho spárovat s vysílačkou, tento proces je označován jako „bindování“. Vysílač je při tomto procesu přepnut do párovacího módu. Na přijímači je provedena akce, nejčastěji stisk **párovacího tlačítka** či zkrat dvou kabelů, za účelem obeznámení o příchozím signálu. Pokud je signál přijat, jsou obě zařízení restartována, což signalizuje úspěšné ukončení párovacího procesu.

³⁵ **telemetrie** – zpětné vysílání přijímače do vysílače obsahující informace o letu (výšku, rychlost atd.)

Přijímač využitý v praktické části práce se specifikacemi:

Tabulka 17 – Specifikace přijímače, zdroj: autor, obr. [54]

Přijímač		Vizualizace
Značka	FrSky	
Název	R-XSR	
Telemetrie	Ano	
Protokol	SBUS, 16 kanálů	
Dosah	>1,5 km	
Způsob připojení k letové jednotce		GND, 5V, SBUS, S. Port

5.6 Akumulátor

Kvadrokoptéra při letu spotřebovává velké množství proudu, mnohdy až několik desítek ampérů. Z tohoto důvodu nejčastěji využívají **lithium-polymerové baterie** (dále jen „LiPo“). Na svoji relativně malou velikost a hmotnost dokážou dodávat dostatečně velký proud, a to po přijatelně dlouhou dobu, která je potřebná k letu. Nevýhodou těchto baterií je nutnost časté kontroly napětí jednotlivých **článků**. LiPo baterie se zpravidla skládají z několika samostatných článků, kdy je nutné, aby všechny disponovaly jednotným napětím. Jeden článek má při **vybitém stavu 3,5 V** a při stavu **nabitém 4,2 V**. Nabíjení probíhá rovnoměrně pomocí **balančního konektoru**. Akumulátory se na trhu prodávají pod různými označeními, pro rozbor parametrů byl využit akumulátor z praktické části práce:

CNHL Black Series 1300mAh 6S 100C

Značka a název Kapacita Počet článků Vybíjecí proud

Z rozboru je patrné, že akumulátor má 6 článků, kdy můžeme vypočítat jeho maximální napětí následovně: $4,2 * 6 = 25,2 \text{ V}$. Jeho kapacita je 1300mAh , což udává úroveň proudu, který je schopen udržovat po dobu 60 minut. Vybíjecí proud označuje maximální možnou hodnotu, kterou může být akumulátor vybíjen. V tomto případě ji můžeme vypočítat za pomoci vzorce ($I = X * C$), což je: $1,3 * 100 = 130 \text{ A}$.

Nabíjení je obecně doporučováno proudem o výkonu 1C, pro zamezení poškození akumulátoru. [38]

Dodávaný proud do dronu může být mnohdy až 160 A, proto je nutné, využívat správné konektory i kabely. Nejrozšířenějším konektorem pro pětipalcové kvadrokoptéry je **XT60**, o průměru 3,5 mm. Jeho maximální zatížení se pohybuje okolo 60 A. Tyto konektory jsou zpravidla napojeny na silové kabely, kterými je proud veden přímo do regulátoru. Tyto kabely jsou děleny na základě průchozího zatížení, kdy každý z nich má své označení AWG³⁶. Pro pětipalcové kvadrokoptéry se nejčastěji využívá AWG hodnota 12–16 (41–22 A). [38]

Akumulátor využitý v praktické části práce se specifikacemi:

Tabulka 18 – Specifikace akumulátoru, zdroj: autor, obr. [55]

Akumulátor		Vizualizace
Značka	CNHL	
Název	Black Series	
Kapacita	1300mAh	
Počet čl.	6S (25,2 V)	
Vybíjecí pr.	100C (130 A)	
AWG	12 (41 A)	
Způsob připojení k regulátoru		

5.7 FPV systém

FPV z angl. *First Person View*, označuje systém, který umožňuje sledování živého přenosu z kvadrokoptéry za pomoci **speciálních brýlí**. Tento způsob přináší pilotovi jedinečný adrenalinový zážitek a vytváří dojem „pomyslného kokpitu“. Systém se skládá ze dvou hlavních komponentů, a to FPV kamery a video vysílače. Jedná se o pouhé rozšíření, bez kterého by kvadrokoptéra byla schopna letu.

³⁶ **AWG** – z angl. *American Wire Gauge*, označuje průměr kabelu, s větší hodnotou AWG se průměr kabelu i přeneseného proudu zmenšuje

5.7.1 FPV kamera

Kamera je hlavním prvkem vizuální stránky letu. Zprvopočátku FPV byly na kvadrokoptérách využívány bezpečnostní kamery, s nárůstem popularity tohoto odvětví se již několik firem zaměřilo přímo na kamery určené pro drony. Podobně jako u ostatních komponentů je velikost klíčovým faktorem. Mezi nejprodávanější velikosti na trhu náleží:

- **Micro** (19x19mm) – nejpoužívanější velikost
- **Mini** (22x22mm)
- **Standard** (28x28mm)

Důležitým parametrem při výběru kamery je **latence**. Přenos mezi kamerou a brýlemi je v řádu milisekund, a to nejčastěji od 6 – 20ms. V případě letu o rychlosti 100 km/h a latenci 40ms bude zpoždění v brýlích 1,4 metru, což může být v případě nutnosti manuálního zamezení kolize klíčové. Při výběru je nutné také řešit poměr stran, kdy zpravidla je možné přepínat mezi 4:3 a 16:9. Posledním kritériem při volbě kamery je kódování videa. Pokud budeme uvažovat o **analogovém přenosu**, můžeme vybírat mezi **NTSC** a **PAL**. PAL disponuje vyšším rozlišením obrazu, ale je schopen přenosu pouze 25 snímků za vteřinu. Naopak NTSC má obraz v nižší kvalitě, nicméně je schopen provádět přenos až 30 snímků za sekundu. Ovšem analogový přenos je již z hlediska kvality a rychlosti považován za **zastaralý**. Digitalizace postihla i kamery dronů a v dnešní době je moudré využívat **digitální systém**, který nabízí Full HD rozlišení a až 120 snímků za sekundu (viz Obr. 25). [39]



Obrázek 25 – rozdíl kvality přenosu digitálního a analogového FPV systému, zdroj: <https://live.rotorama.cz/wp-content/uploads/2020/10/Digitalvsanalog.png>

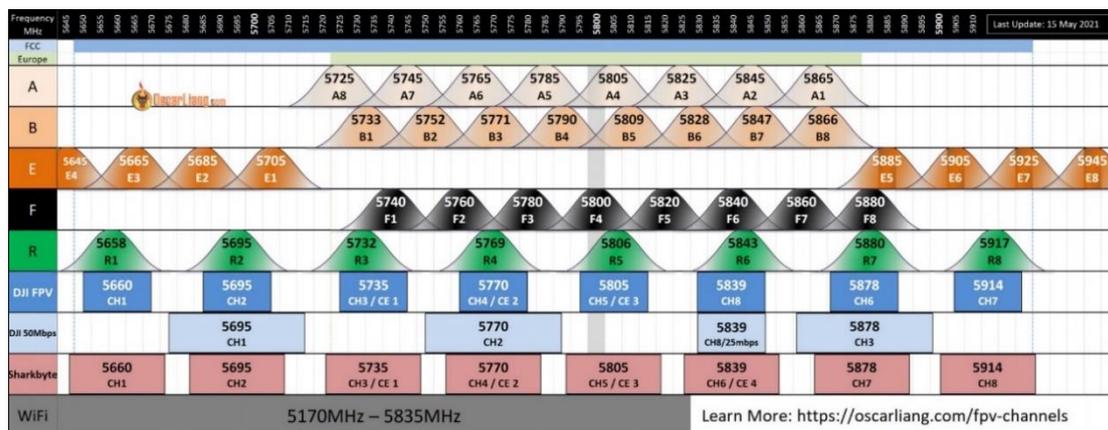
Analogová FPV kamera využitá v praktické části práce se specifikacemi:

Tabulka 19 – Specifikace FPV kamery, zdroj: autor, obr. [56]

FPV kamera		Vizualizace
Značka	Caddx	
Název	Ratel 2	
Velikost	Micro (19x19mm)	
Kódování	NTSC/PAL	
FOV	165°	
Poměr str.	4:3, 16:9	
Způsob připojení k letové jednotce		GND, 5-40V, Video out

5.7.2 Video vysílač

Video vysílač (dále jen „VTX“), je klíčovou komponentou pro přenos zaznamenaného obrazu kamerou do brýlí či jiného obrazového přijímače. Video vysílač je poměrně komplexní součástka, a proto se u něj rozlišuje několik základních parametrů. Prvním z nich jsou kanály, kdy **analogový video vysílač** podporuje zhruba **40 kanálů**, resp. 5 pásem, kdy každé z nich má 8 kanálů. Při určení pásma a kanálů je možné spustit vysílání zpravidla o frekvenci **5,8 GHz**, kdy všechny přijímače nastavené na stejných parametrech přijímají obraz. Digitální video vysílač naopak podporuje pouze 8 kanálů (viz Obr. 26). [40]



Obrázek 26 – přehled vysílací tabulky pásem a frekvencí, zdroj: <https://live.rotoroma.cz/wp-content/uploads/2022/08/5.8ghz-fpv-channels-chart-diagram-frequency-analog-digital-dji-sharkbyte-05-21.jpg>

Každý video vysílač obsahuje funkci pro nastavení síly vysílacího signálu, který je zpravidla udáván v miliwattech. Na trhu se vyskytují modely s výkonem od **25mW do 2W**, kdy se s vyšším nastaveným výkonem rapidně zvyšuje dosah a kvalita vysílání za cenu zvýšení teploty vysílače. Nastavení video vysílače společně s implementací vysílací tabulky probíhá výhradně ve vybraném firmwaru. Podobně jako letová jednotka i video vysílače fungují na bázi protokolů, nejčastěji používanými protokoly jsou **SmartAudio** a **IRCTramp**. Rozdílem mezi nimi je pouze fakt, že IRCTramp je starší protokol využívaný zejména pro analogové FPV systémy. Novějším protokolem je SmartAudio, které již využívá digitální signál, proto je vhodné pro digitální FPV systémy. [40]

Poslední funkcí, která úzce souvisí s přenosem obrazu do video přijímače je **OSD** z angl. *On Screen Display*, označuje funkci implementace telemetrických dat přímo do přenášeného obrazu. Pilot je následně v brýlích schopen vidět kromě přenosu samotného i **parametry letu** např. výšku, rychlost, údaje o baterii atd.

Analogový video vysílač využitý v praktické části práce se specifikacemi:

Tabulka 20 – Specifikace video vysílače, zdroj: autor, obr. [57]

Video vysílač		Vizualizace
Značka	iFlight	
Název	Succex Force	
Výkon	25 – 800mW	
Protokol	IRCTramp	
OSD	Ano	
Konektor	MMCX	
Způsob připojení k letové jednotce		

5.8 Senzory zajišťující autonomii

Senzory plní důležitou funkci, pomocí které dokáže kvadrokoptéra určit svoji pozici v prostoru. Pilotovi předávají také informace o letu pomocí telemetrie. Většina z nich je plně integrována do letové jednotky, avšak existují i takové, které se instalují samostatně. Popis senzorů podporovaných firmwarem **iNav**:

5.8.1 GPS

GPS z angl. *Global Positioning System*, označuje modul, který je často využíván v autonomních dronech, zejména k získávání přídatných dat z letu. Nejčastěji se jedná o pozici, rychlost či počet právě připojených satelitů. S použitím GPS modulu můžeme vylepšit i letový komfort a zpřístupnit sadu nových funkcí. Mezi nejpoužívanější funkce můžeme zařadit **Return to Home** či **Position Hold**. Nejvyužívanější funkcí je však již mnohokrát zmíněný **plánovač misí**, dle kterého kvadrokoptéra autonomně provádí letovou misi implementovanou přímo do letové jednotky. [41]

GPS modul využitý v praktické části práce se specifikacemi:

Tabulka 21 – Specifikace GPS modulu, zdroj: autor, obr. [58]

GPS modul s magnetometrem		Vizualizace
Značka	Beitian	
Název	BN-880	
Počet kan.	72	
Hmotnost	10 g	
Způsob připojení k letové jednotce		SDA, GND, TX, RX, VCC, SCL

5.8.2 Gyroskop

Jedná se o první část inerciálně měřící jednotky. Úkolem gyroskopu je měřit úhel náklonu v třech hlavních osách **X, Y a Z**. Gyroskop se využívá také k vyvážení, bez něj by kvadrokoptéra nebyla schopna udržet stabilitu při letu. [33]

Gyroskop MEMS MPU-6050 využitý v praktické části práce je integrován v IMU typu MPU6000.

5.8.3 Magnetometr

Magnetometr neboli kompas, slouží k informování dronu o jeho nasměrování při letu. Zpravidla je integrován v letových jednotkách či GPS modulech.

Magnetometr HMC5883L využitý v praktické části práce je integrován do GPS modulu Beitian BN-880.

5.8.4 Akcelerometr

Druhou částí inerciálně měřící jednotky je akcelerometr, jehož úkolem je měřit akceleraci v osách X, Y a Z. [33]

Akcelerometr MEMS ADXL345 využitý v praktické části práce je integrován v IMU typu MPU6000.

5.8.5 Barometr

Barometr slouží pro získání výškových informací letu. Nejčastěji je integrován přímo do letových jednotek. Výhodou osazení barometru je možnost využití funkce letu při fixní výšce. [33]

Barometr BMP280 využitý v praktické části práce je integrován v letové jednotce iFlight SucceX-E F4 V2.1.

5.8.6 LiDAR

LiDAR z angl. *Light Detection and Ranging*, označuje senzor využívaný k provádění laserového měření vzdálenosti pomocí času letu odraženého paprsku od povrchu zasaženého objektu. Jedná se o samostatné zařízení. Výstupem je poté interpolovaný digitální 3D model povrchu, z kterého je možné získat kompletní model terénu. Tato metoda se využívá zejména v mapování půdy. [42]

LiDAR nebyl v praktické části práce využit z důvodu vysokých pořizovacích nákladů.

5.8.7 Sonar

Sonar slouží zejména k měření vzdálenosti mezi kvadrokoptérou a objekty nacházejícími se pod ní. Hlavní aplikací sonaru je upravení výšky letu v případě detekování náhlého stoupání. Detekce objektů probíhá pomocí ultrazvukových vln.

Sonar nebyl v praktické části práce využit z důvodu vysokých pořizovacích nákladů a aplikace barometru pro identický účel.

5.8.8 Speed

Jak již název napovídá, jedná se o rychlostní senzor, který měří rychlost letu oproti okolí. Při využití tohoto senzoru je možné použít funkci fixní rychlosti letu. Speed může být integrován přímo v letové jednotce nebo externě připojen.

Speed nebyl v praktické části práce využit z důvodu získávání informací o rychlosti letu pomocí implementovaného GPS modulu.

6 Praktická část – Návrh technického řešení a postup konstrukce autonomního dronu

Předmětem této části práce je zdokumentovat kompletní postup konstrukce autonomního dronu včetně jeho součástí, periférií i přídatných 3D vytištěných komponentů. Konstrukčně jsem se rozhodl vytvořit dron o velikosti 5“ z důvodu standartního rozměru.

6.1 Výroba dílů dronu pomocí 3D tisku

Z důvodu zachování rentability technického řešení byly díly dronu vytištěny pomocí 3D tiskárny. Tištěné díly (soubory s příponou *STL*) byly převzaty od uživatelů *Dave_C_FPV* a *Lipcsey* z portálu *thingiverse.com*. Přesněji se jedná o rám³⁷ a úchyt³⁸ GPS senzoru.

Pro vytištění dílů byla použita tiskárna **PRUSA I3 MK3S+**. Oba díly jsou vytištěny z odlišných filamentů z důvodu odlišných funkcionalit. Pro tisk rámu byl vybrán polymerní filament **Prusament PA11** neboli **Nylon**, který je díky své odolnosti vhodný pro ochranu elektronických komponentů dronu.

Z důvodu zamezení přenosu vibrací při letu do GPS senzoru byl pro tisk úchytu vybrán flexibilní **TPU** (termoplastický polyuretan) filament pod názvem **A95**.

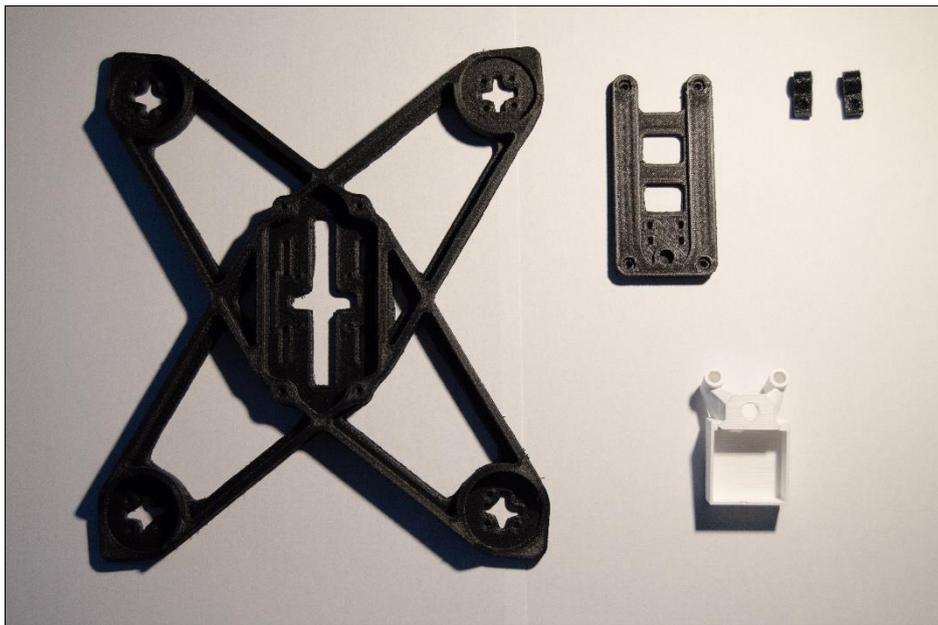
Finální tisk byl složen ze čtyř částí, přičemž probíhal po 0,15 mm vrstvách. Komponenty rámu byly vytištěny se 100% výplní pro zajištění maximální pevnosti. Úchyt na GPS byl poté vytištěn s požadovanou 70% výplní z důvodu vyšší flexibility.

Kompletní tisk rámu trval necelých 7 hodin s finální váhou **82 gramů**, výsledek tisku (viz Obr. 27).

Detailní specifikace vytištěných komponentů (viz Příloha 3).

³⁷ <https://www.thingiverse.com/thing:3310882>

³⁸ <https://www.thingiverse.com/thing:3840528>



Obrázek 27 – výsledek provedeního 3D tisku, zdroj: autor

6.2 Instalace deskového regulátoru a motorů

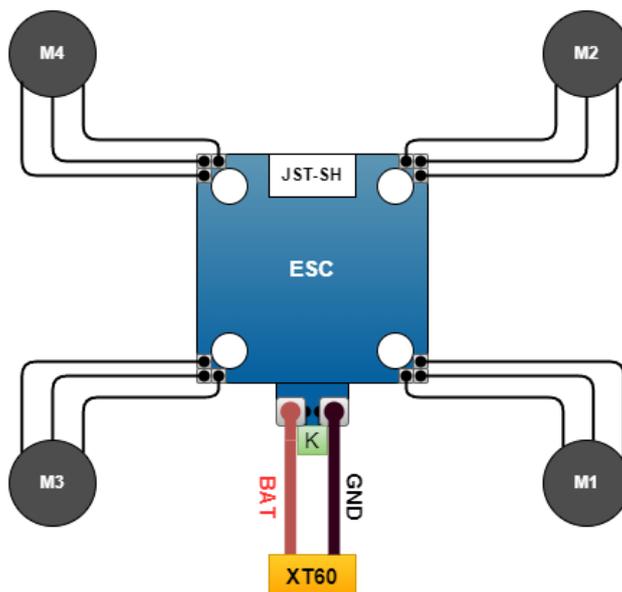
Komponenty byly na vytištěný rám umístěny do tzv. **stack architektury**, kdy jsou jednotlivé komponenty řazeny nad sebou. Z tohoto důvodu byly zespodu rámu umístěny čtyři šrouby typu M3 o délce 30 mm, na které byly jednotlivé komponenty instalovány.

Prvním z nich byl již zmíněný deskový regulátor **SucceX-E 45A V2**, k jehož pájecím destičkám byly pomocí hrotové pájky připájeny čtyři **iFlight XING-E Pro 2207 1800KV** motory. Každý z nich disponuje třemi 150 milimetrovými 20AWG kabely, pomocí kterých jim jsou předávány informace a příkazy z regulátoru.

Pro zajištění napájení kvadrokoptéry akumulátorem, byly do spodní části regulátoru připájeny také dva silové kabely typu 14AWG s barevným označením polarity (**červený +**, **černý -**). Takto velký průměr vodičů byl vybrán z důvodu nutnosti přenosu velkého množství elektrického proudu do regulátoru. Na konec těchto kabelů byla napájena koncovka **XT60** a následně pomocí smršťovací bužírky odizolována pro zamezení vzniku možného zkratu.

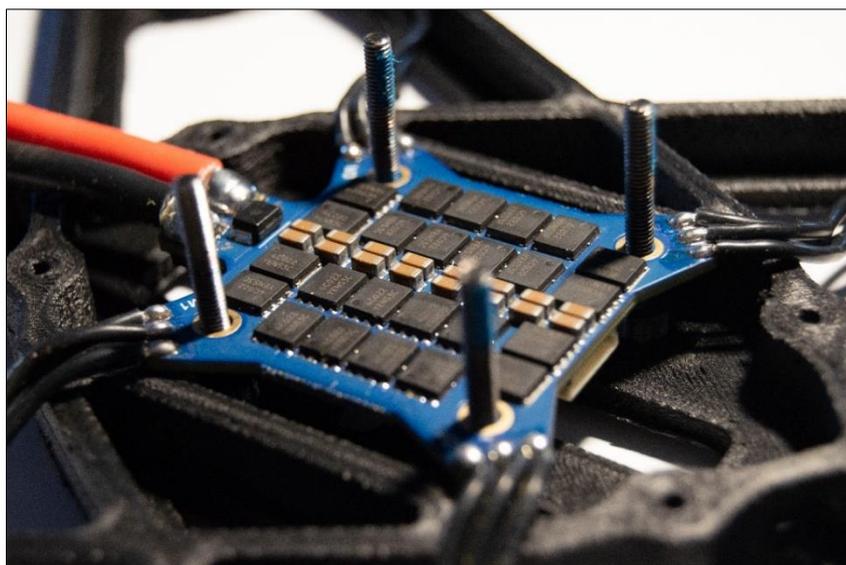
Pro zachycení napěťových výkyvů akumulátoru, byl do pájecích spojů silových kabelů napájen kondenzátor **470 μ F 35V**.

Kompletní průběh pájení je zachycen v následujícím diagramu (viz Obr. 28).



Obrázek 28 – diagram pájení motorů a silových kabelů na regulátor s vysvětlivkami, zdroj: autor

Následně byl regulátor nasazen na již zmíněné šrouby a zabezpečen gumovými podložkami. Motory byly přimontovány na jednotlivá ramena rámu pomocí čtyř M3 šroubů o délce 8 mm. Detail regulátoru a provedených pájecích prací (viz Obr. 29).

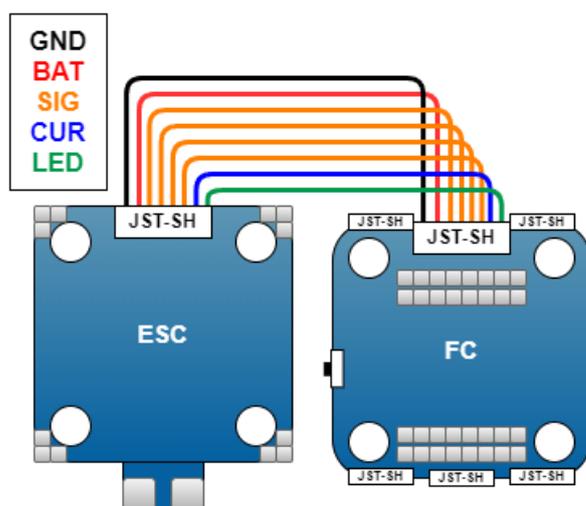


Obrázek 29 – detailní pohled na regulátor a provedené pájecí spoje, zdroj: autor

6.3 Propojení letové jednotky a regulátoru

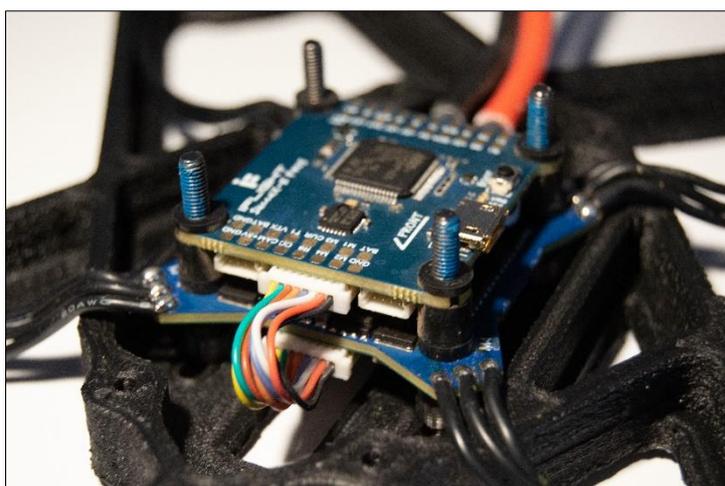
Pro plné fungování a předávání potřebných instrukcí, musí být regulátor připojen napřímo k letové jednotce. Toto propojení je nejčastěji realizováno pomocí **JST kabelu** z angl. *Japan Solderless Terminal*, které jak již název napovídá, odstraňuje nutnost pájení a ulehčuje tak konstrukci kvadrokoptéry. Pro toto propojení byl využit kabel s osmi piny.

Detail propojení je zachycen v následujícím diagramu (viz Obr. 30).



Obrázek 30 – diagram propojení regulátoru a letové jednotky s vysvětlivkami, zdroj: autor

Z diagramu je patrné, že pro každý jednotlivý motor existuje signální kabel, čímž se rapidně urychluje předávání příkazů do každého z nich. Detail provedení propojení s usazením na M3 šrouby o délce 30 mm (viz Obr. 31).



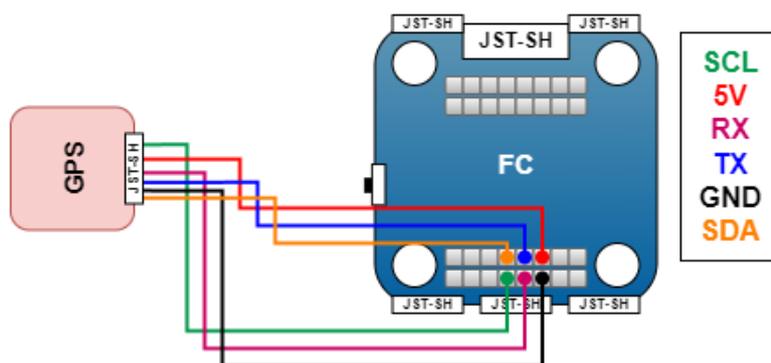
Obrázek 31 – propojení regulátoru a letové jednotky, zdroj: autor

6.4 Instalace GPS s magnetometrem

Pro plnou funkčnost autonomního letu byla k letové jednotce nainstalována i GPS typu **Beitian BN-880**, která umožňuje sledování geografické polohy kvadrokoptéry v letu, čímž kladně přispívá k jejímu jednoznačnému určení v případě vzniku nouzových situací. Její další využití můžeme najít i v plánovači misí, kdy při letu kvadrokoptěře napomáhá při orientaci mezi jednotlivými body mise.

Často integrovaným senzorem v GPS je i **magnetometr**, který určuje orientaci dronu v prostoru vzhledem k magnetickému severu. Magnetometr implementovaný v praktické části je označován jako **HMC5883L**.

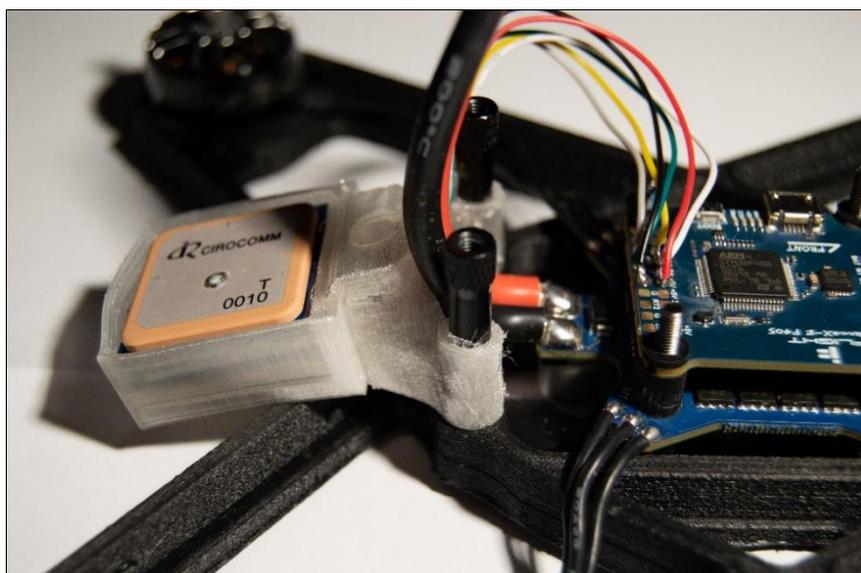
Připojení zmíněného GPS modulu je realizováno pomocí JST kabelu se šesti piny na straně modulu a napájení na pájecí destičky na straně letové jednotky. Detail propojení je zachycen v následujícím diagramu (viz Obr. 32).



Obrázek 32 – diagram propojení letové jednotky a GPS modulu s vysvětlivkami, zdroj: autor

Z diagramu je patrné, že kromě obecných parametrů jsou předávány i parametry speciální jako **SDA** a **SCL**. SDA z angl. *Serial Data*, označuje přenos dat v sériové podobě, nejčastěji však data z magnetometru a pozici GPS. SCL z angl. *Serial Clock*, zajišťuje synchronní přenos mezi dvěma zařízeními, čímž reguluje rychlost sériového přenášení dat.

GPS modul byl následně usazen do vytištěného úchyty magnetometrem nahoru a nainstalován na 30 mm zadní hliníkové sloupky. Detail provedení pájení a náhled na usazení modulu v úchyty (viz Obr. 33).

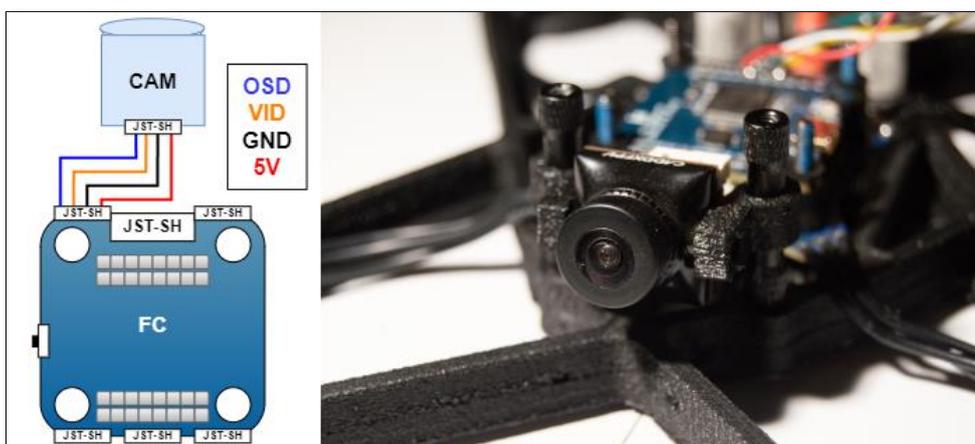


Obrázek 33 – detail propojení GPS modulu a letové jednotky, zdroj: autor

6.5 Instalace FPV kamery

Autonomní kvadrokoptéra byla také rozšířena o FPV systém. Jak již bylo řečeno, komunikace probíhá na frekvenci 5,8 GHz na identické bázi jako analogové televizní vysílání. Tento přenášený obraz je zachycen právě FPV kamerou. Vybranou kamerou pro praktickou část práce byla **Caddx Ratel 2**. Propojení mezi letovou jednotkou a kamerou bylo zajištěno pomocí čtyř pinového JST kabelu. Následně byla kamera upevněna pomocí dvou M1 šroubů o délce 5 mm k vytištěným držákům kamery, které byly následně nainstalovány na 30 mm přední hliníkové sloupky.

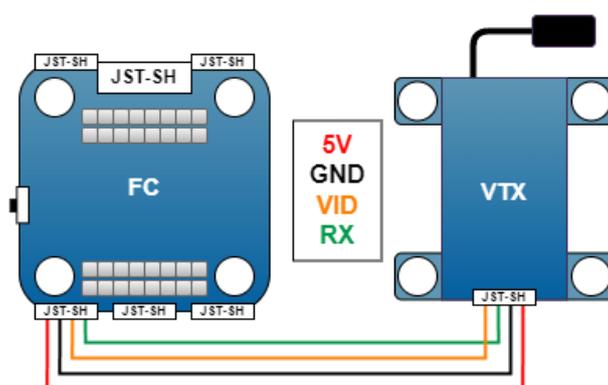
Detail propojení a náhled na instalaci kamery na přední sloupky (viz Obr. 34).



Obrázek 34 – náhled na instalaci FPV kamery s diagramem, zdroj: autor

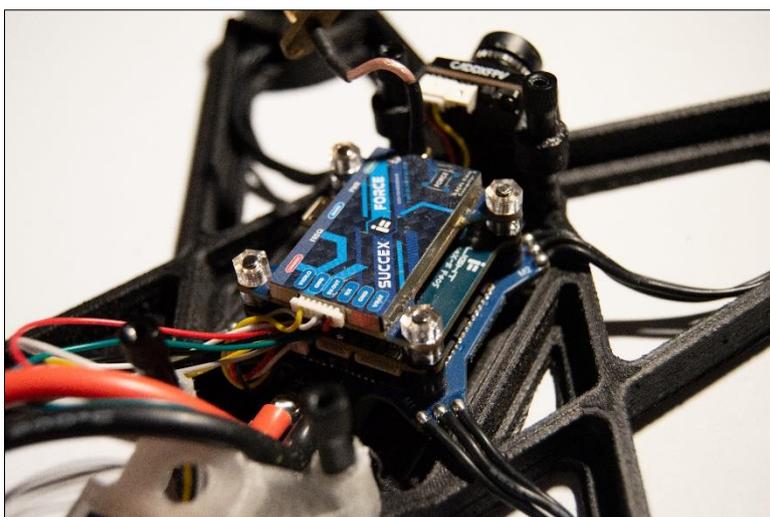
6.6 Instalace video vysílače

Video zachycené kamerou je odesláno do letové jednotky, kde se do něho integrují telemetrické informace letu v podobě OSD. Nejčastěji integrovanými informacemi je napětí baterie, pozice, rychlost či vzdálenost od bodu vzletu. Takto obohacené video je dále předáno do video vysílače, z kterého je širokopásmově vysíláno a zachycováno na speciálních video přijímačích. Video vysílač vybraný pro praktickou část byl **iFlight SucceX Force**. Propojení s letovou jednotkou bylo realizováno pomocí čtyř pinového JST kabelu, detailní pohled na diagram propojení (viz Obr. 35).



Obrázek 35 – diagram propojení letové jednotky a video vysílače s vysvětlivkami, zdroj: autor

Video vysílač byl naistalován na šrouby typu M3 jako finální komponenta stack architektury. Detail provedeného propojení komponentů (viz Obr. 36).



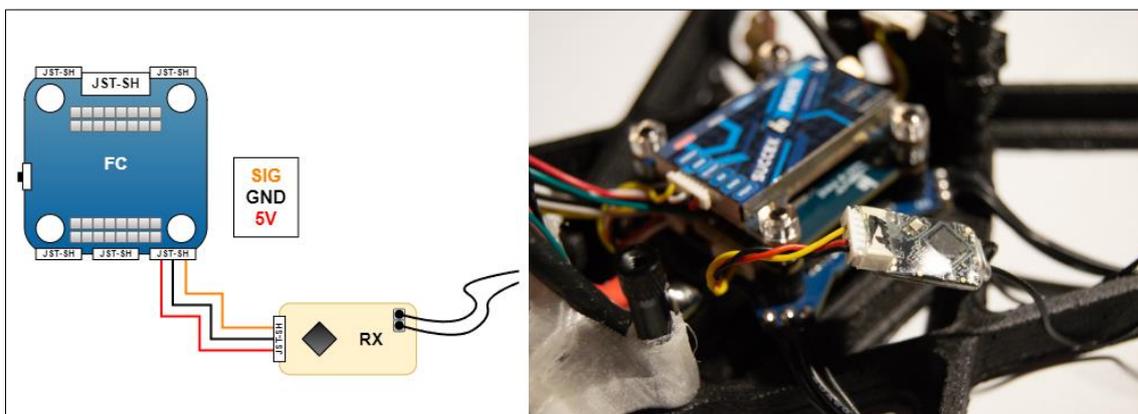
Obrázek 36 – propojení video vysílače a letové jednotky s upevněním do stacku, zdroj: autor

Pro vytvoření prostoru mezi letovou jednotkou a video vysílačem byly využity gumové podložky, čímž bylo zabráněno případnému vzniku zkratu. Jak je již z obrázku patrné, architektura byla zakončena čtyřmi M3 maticemi. Na video vysílač byl také na závěr nainstalován vývod s koncovkou MMCX pro umožnění následné instalace antény. Tímto byla instalace FPV systému dokončena.

6.7 Instalace přijímače

Z důvodu spouštění mise, kontrolu telemetrie či převzetí řízení v případě krizové situace byl na kvadrokoptéru nainstalován radiový přijímač. Pro využití v praktické části byl vybrán přijímač **FrSky R-XSR**. Před samotnou instalací bylo provedeno flashování firmwaru na evropskou verzi, přesněji na **ACCST LBT 2.1.0**.

Po provedeném flashování bylo nutné přijímač spárovat s radiovou vysílačkou **FrSky Taranis X9 Lite**. Pro párování bylo nutné přepnout vysílačku na párovací mód, což mělo za následek spuštění zvukové signalizace. Následným stiskem párovacího tlačítka na přijímači byla komunikace navázána a párování úspěšně ukončeno. Propojení s letovou jednotkou probíhalo opět za pomoci JST kabelu se čtyřmi piny. Diagram provedeného propojení (viz Obr. 37).



Obrázek 37 – náhled na instalaci přijímače s diagramem, zdroj: autor

Po upevnění vrchní části rámu do hliníkových sloupků pomocí čtyř M3 šroubků o délce 10 mm, byl přijímač připevněn stahovacími páskami ze spodní strany vrchní části rámu. Na závěr byla na vývod video vysílače skrze vrchní část rámu nainstalována anténa typu **iFlight Albatross** s konektorem SMA.

Finální fotografie dokončené konstrukce (viz Příloha 4).

7 Praktická část – Implementace řešení a konfigurace letové jednotky

Předmětem této části práce je podrobně zdokumentovat konfiguraci letové jednotky a jejich periférií, která byla provedena v open-source firmwaru **iNav**³⁹ ve verzi 3.0. Tento firmware je odvozenou verzí projektu Cleanflight, který byl vydán v roce 2015. Samostatná verze iNav 1.0 byla vydána roku 2016 s důrazem na autonomní lety a GPS konektivitu.

Pro provedení konfigurace byl využit speciální **iNav konfigurátor**⁴⁰, ve kterém je možné provádět testy funkčních parametrů, zadávat příkazy v CLI, ale i kontrolovat jednotlivé funkčnosti senzorů či **plánovat autonomní mise**.

Firmware iNav využívá komunikační protokol **MavLink** pro zprostředkování komunikace mezi letovou jednotkou a telemetrickými informacemi o letu (výška, rychlost, navigace atd.), přičemž přenos je důkladně zabezpečen. Podobně jako předchozí protokol funguje i sériová sběrnice **I2C**, která zprostředkovává přenos dat mezi letovou jednotkou a jejími perifériemi.

7.1 Připojení letové jednotky a přepis firmware

Po dokončení konstrukce kvadrokoptéry byla letová jednotka připojena pomocí sběrnice microUSB do počítače. Pro její správné rozpoznání počítačem, musely být nainstalovány ovladače CP210x a STM32. Po nainstalování byla jednotka plně rozpoznána konfigurátorem.

Pro provedení flashování firmwaru byla využita záložka **Update Firmware**, ve kterém byl zvolen typ letové jednotky IFLIGHTF4 a požadovaná verze firmwaru na 3.0 stabilní. Následně bylo zaškrtnuto políčko „Full chip erase“, které před přepisem provede kompletní vymazání flash paměti jednotky. U vybraného FC je velikost této paměti nastavena na 2 MB.

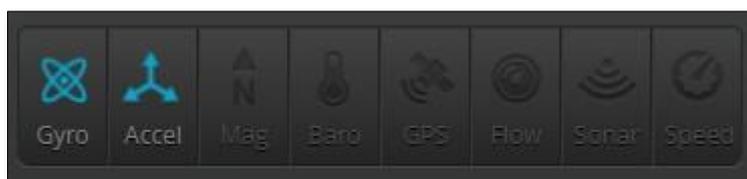
Po stisknutí tlačítka Flash Firmware bylo flashování úspěšně provedeno.

³⁹ <https://github.com/iNavFlight/inav/releases/tag/3.0.0-final>

⁴⁰ <https://github.com/iNavFlight/inav-configurator/releases/tag/3.0.0>

7.2 Aplikace mixeru a nastavení motorů

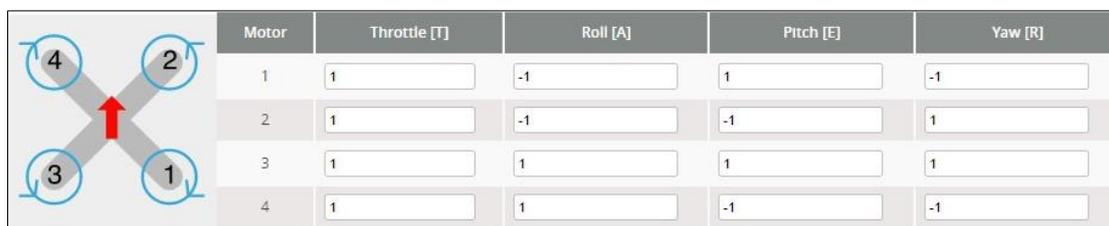
Po provedeném flashování bylo navázáno komunikační spojení pomocí sériového portu **COM3**, čímž bylo zpřístupněno provádění změn v konfigurátoru. Po provedeném připojení byla v levém horním rohu obrazovky vyobrazena verze konfigurátoru iNavu, společně s aktuálně funkčními senzory (viz Obr. 38).



Obrázek 38 – aktuálně funkční senzory letové jednotky před konfigurací, zdroj: autor

Nyní v záložce Mixer bylo nutné provést **mapování** jednotlivých motorů na správné outputy, zjednodušeně řečeno, zkontrolovat, zda každý motor odpovídá své pozici v diagramu. Následně bylo nutné otestovat, zda při pohybu ve všech třech osách X, Y a Z se aktivují správné motory v korektním směru otáčení.

Výsledkem provedeného testování je tabulka mixeru (viz Obr. 39).



	Motor	Throttle [T]	Roll [A]	Pitch [E]	Yaw [R]
4	1	1	-1	1	-1
2	2	1	-1	-1	1
3	3	1	1	1	1
1	4	1	1	-1	-1

Obrázek 39 – nakonfigurovaná tabulka mixeru, zdroj: autor

Jak je již z tabulky patrné, např. při provedení dopředného náklonu (**Pitch**) při letu, jsou výkonově omezeny motory na pozici 2 a 4. Naopak pozice 1 a 3 jsou výkonnostně bez omezení.

Po čas testování bylo zjištěno, že motor na pozici 3 se otáčí po směru hodinových ručiček. Tento problém byl vyřešen pomocí firmwaru **BLHeli**⁴¹, kde byl směr daného motoru otočen.

⁴¹ **BLHeli** – firmware působící na regulátorech, který ovládá směr otáčení motorů a jejich RPM

Pro dokončení konfigurace motorů byly v CLI použity následující příkazy:

```
set motor_pwm_protocol = DSHOT600 //nastavení protokolu motorů
set servo_pwm_rate = 50 //obnovovací frekvence servomotorů v Hz
set motor_idle_pwm = 7,0 //nejnižší hodnota otáčení motorů
set motor_poles = 14 //počet magnetů na bezkartáčovém motoru
```

7.3 Kalibrace GPS modulu a senzorů

V konstrukční části práce byl GPS modul napájen na port **UART4**. Pro její korektní fungování musela být na zmíněném UARTu v záložce Ports povolena funkce GPS. Následně byla provedena sada konfiguračních příkazů v CLI:

```
set gps_protocol = UBLOX //nastavení protokolu GPS
set gps_aid_ground = AUTO //pomocná detekce zpřesňující pozici
set timezone_offset = 0 //nastavení posunu času v minutách
set gps_sbas_mode = EGNOS //nastavení evropského systému GPS
```

Tímto byla GPS v prostředí iNav povolena a nakonfigurována. Následně bylo nutné povolit i ostatní funkční senzory letové jednotky i GPS modulu následujícími příkazy:

```
set mag_hardware = HMC5883 //povolení magnetometru v GPS modulu
set baro_hardware = BMP280 //povolení barometru na FC
set acc_hardware = MPU6000 //povolení akcelerometru na FC
```

Po povolení komunikace jednotlivých senzorů muselo být provedeno jejich individuální nakonfigurování. Magnetometr, který se nachází na GPS modulu musel být zkalibrován na magnetický sever, který se oproti severu zeměpisnému pohybuje. Tento úhlový rozdíl se nazývá **magnetická deklinace** a je důležitým faktorem při zajištění správného fungování magnetometru. Pro nalezení úhlového rozdílu byl použit následující web⁴². V místě testování helikoptéry byla naměřena hodnota magnetické deklinace **+5° 11'**, což bylo aplikováno na následující příkaz do CLI:

```
set mag_declination = 511 //magnetická deklinace místa testování
```

Před otestováním funkčnosti musel být magnetometr zkalibrován.

⁴² <https://www.magnetic-declination.com/>

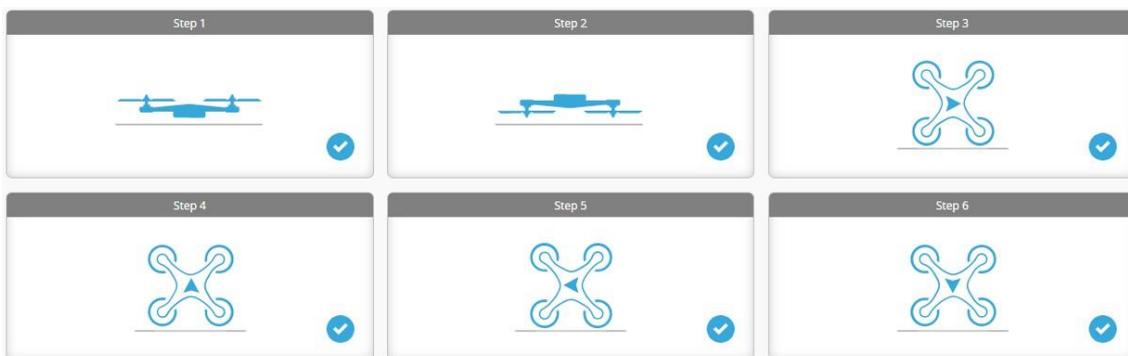
Firmware iNav obsahuje řadu speciálních funkcí, jako je například možnost spuštění kalibrace magnetometru synchronizovaných pohybem páček vysílačky. Pohybem **levé páčky nahoru a doprava** společně s **pravou páčkou dolů** byla zahájena třicetisekundová kalibrace. Kvadrokoptéra musela být precizně otočena v osách X, Y a Z načež náhodně, až do ukončení kalibrace.

Následně byly hodnoty kalibrace uloženy. Při testování funkčnosti magnetometr vykazoval známky vychýlení o 270°, přičemž musel být o 90° otočen pomocí příkazu:

```
set mag_align_yaw = 90 //otočení orientace magnetometru o 90 stupňů
```

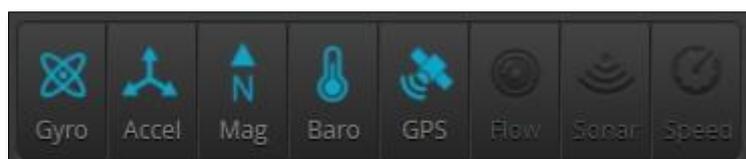
Kalibrace gyroskopu zahrnovala pouze usazení kvadrokoptéry na vodorovnou plochu a spuštění kalibračního procesu. Barometr letové jednotky nevyžaduje žádné speciální kalibrace.

Konfigurace akcelerometru probíhala pomocí grafického rozhraní konfiguratoru. Po zahájení kalibrace tlačítkem Calibrate, musela být kvadrokoptéra polohována do následujících pozic (viz Obr. 40).



Obrázek 40 – proces kalibrace akcelerometru, zdroj: autor

Výsledkem provedených kalibrací bylo zaktivování všech potřebných senzorů nutných pro provedení autonomního letu (viz Obr. 41).

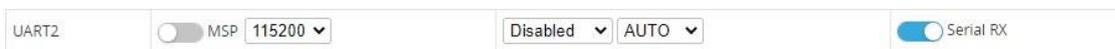


Obrázek 41 – aktuálně funkční senzory po provedené kalibraci, zdroj: autor

7.4 Mapování koncových bodů a kanálů přijímače

V této práci přijímač neplní funkci ovládání, nicméně byl nastaven z důvodu možné nutnosti převzetí řízení v případě krizové situace. Jak je již patrné, vysílač s kvadrokoptérou komunikuje na základě kanálů. Každý z nich plní jinou funkci a v případě manuálního letu společně ovládají let.

Mezi základní kanály patří: **T** – Throttle, **E** – Pitch, **R** – Yaw a **A** – Roll. Nejčastěji jsou namapovány na kanály 1–4. Pro ověření pozice kanálů musel být na portu UART2 pod sloupcem RX povolen **Serial RX**, čímž bylo určeno, že přijímač se nachází na daném portu (viz Obr. 42).



Obrázek 42 – povolení přijímání sériového vysílání na portu UART2, zdroj: autor

Dále byly pro konfiguraci přijímače použity následující CLI příkazy:

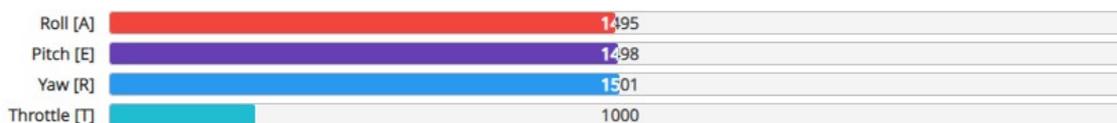
```
set receiver_type = SERIAL //nastavení typu přijímače
set serialrx_provider = SBUS //SBUSový přijímač
set serialrx_inverted = OFF //neinvertovaný sériový port
set serialrx_halfduplex = AUTO //povolení half-duplexní komunikace
```

Po provedení sady příkazů byly signály z vysílače namapovány jednotlivé kanály na **TERA**. Po otestování fungování muselo být změněno mapování na **TAER**. Jednotlivé koncové body byly nastaveny na rozmezí 1000–2000, přičemž pomocí následujících příkazů byly přenastaveny minimální a maximální hranice platného signálu:

```
get min_check //vypsání aktuálního min_check
min_check = 1100 //výpis
Allowed range: 1000–2000 //povolená hranice
set min_check = 1010 //nastavení minimálního platného signálu
min_check set to 1010 //potvrzení
```

```
get max_check //vypsání aktuálního max_check
max_check = 1900 //výpis
Allowed range: 1000–2000 //povolena hranice
set max_check = 1990 //nastavení maximálního platného signálu
max_check set to 1990 //potvrzení
```

Náhled na hodnoty jednotlivých kanálů při páčkách v neutrální poloze (viz Obr. 43).



Obrázek 43 – hodnoty jednotlivých kanálů při neutrální poloze páček, zdroj: autor

7.5 AUX módy

Základní ovládání kvadrokoptéry je umožněno pomocí čtyř základních kanálů. Kromě nich můžeme také využívat kanály přídatné, které mohou být použity k zaslání speciálních příkazů letové jednotce. Zpravidla jich může být až několik desítek. Tyto kanály jsou ovládány pomocí speciálních switchů, které se nachází na radiové vysílače. V případě této práce se bude jednat o kanály s označením 5–7. V CLI bylo nadefinováno několik základních AUX módů následujícími příkazy:

```
set aux 4 13 1 1700 2100 //opatření proti neúmyslnému spuštění motorů
set aux 0 0 0 900 1300 //roztočení motorů (ARM) kvadrokoptéry
set aux 2 11 2 1375 1625 //funkce na držení pozice pomocí GPS
set aux 3 28 2 1800 2100 //spuštění autonomní mise
```

Syntaxe provedených příkazů je následovná:

číslo idPříkazu auxKanál minHranice maxHranice

Jak je již patrné, každý aux mód obsahuje minimální a maximální hranici, ve které se signál musí nacházet, aby byl daný mód spuštěn. Aux mód s označením 3 obstarává spuštění a kontrolu letu autonomní mise. Po jejím dokončení zpravidla následuje aplikování funkce Return to Home, která byla nastavena následovně:

```
set nav_rth_altitude = 3500 //navigace na domovský bod při výšce 35 m.
set rth_home_alt = 0 //nastavení výšky přistání (zem - 0 metrů)
```

Jak je již z příkazů patrné, dron z bezpečnostních důvodů při aktivování RTH funkce vyšplhá do výšky 35 metrů a následně je navigován k domovskému bodu. Při jeho dosažení zahájí pomalé klesání až do výšky prvotního vzletu, čímž přistane.

Domovský bod je nastaven vždy při prvním armu kvadrokoptéry.

7.6 Aplikace PID algoritmu

Kompletní autonomní řízení dronu obstarává PID algoritmus, který upravuje chování regulátoru na základě koeficientů, které jsou uživatelem nastaveny. Zpravidla se konfiguruje pro každou letovou osu zvlášť. Při letu jsou tyto hodnoty násobeny všemi třemi aktuálními složkami PID, a to v průměru 8000krát za sekundu.

V případě manuálního ovládání mají koeficienty velký dopad na ovládání dronu. Nicméně i jejich špatné nastavení při použití autonomních režimů může mít za následek velké odklony od trasy, nestabilitu kvadrokoptéry atd.

Po několika letových testech a mnoha úpravách byly nalezeny hodnoty, které vykazovaly minimální odklony od trasy společně s nulovými vibracemi. Jejich nastavení pro profil 0 bylo provedeno následujícími příkazy:

```
# profile 0 //označení profilu PID hodnot
set p_pitch = 40 //proporcionální osa PITCH
set i_pitch = 30 //integrální osa PITCH
set d_pitch = 23 //derivativní osa PITCH
set p_roll = 40 //proporcionální osa ROLL
set i_roll = 30 //integrální osa ROLL
set d_roll = 23 //derivativní osa ROLL
set p_yaw = 85 //proporcionální osa YAW
set i_yaw = 45 //integrální osa YAW
set d_yaw = 0 //derivativní osa YAW
```

Derivační hodnota osy YAW je záměrně nulová z důvodu zajištění plynulého letu při natáčení kvadrokoptéry na tuto osu.

Zadané hodnoty byly pro větší čitelnost zaneseny do konfigurační tabulky (viz Tabulka 22).

Tabulka 22 – Konfigurační tabulka PID koeficientů, zdroj: autor

Název osy	Proporcionální	Integrální	Derivativní
<i>Roll</i>	40	30	23
<i>Pitch</i>	40	30	23
<i>Yaw</i>	85	45	0

7.7 Konfigurace FPV systému

Nastavení FPV systému probíhalo na základě evropské vysílací tabulky frekvencí (viz Obr. 26). Komunikace vybraného video vysílače pro praktickou část probíhá na základě protokolu **IRCTramp**, který byl nastaven a připojen v záložce Ports na UART2. Vybrané vysílací pásmo bylo **Raceband**, kanál 1 o frekvenci **5658 MHz**. Nastavení těchto parametrů bylo provedeno následujícími příkazy do CLI:

```
set vtx_band = 5 //nastavení vysílacího pásma na Raceband
set vtx_freq = 5658 //nastavení frekvence vysílání (kanál 1)
set vtx_power = 4 //nastavení síly vysílání VTX na 400 mW
set vtx_low_power_disarm = ON //ochrana proti přehřívání VTX
```

V záložce OSD bylo provedeno nahrání defaultního fontu do letové jednotky pomocí OSD Font Manageru. Po provedeném nahrání fontu byla do CLI zadána sada příkazů pro zviditelnění požadovaných informací. Z důvodu využití kvadrokoptéry k autonomním účelům, bylo OSD nakonfigurováno následovně:

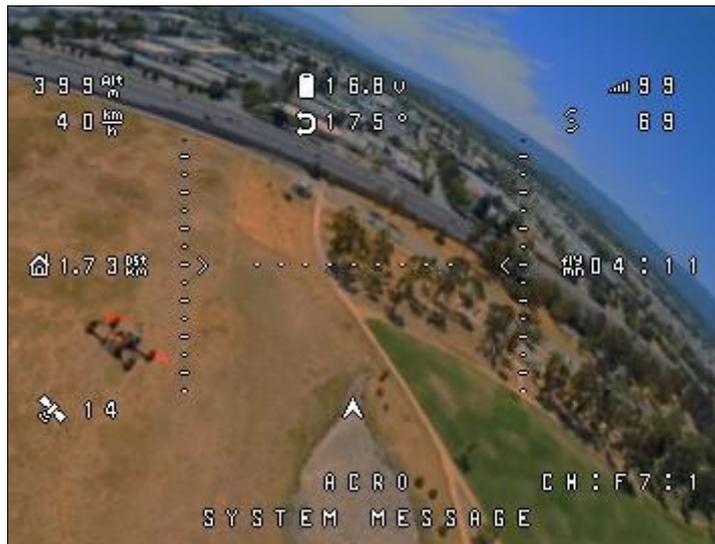
```
#osd
set osd_video_system = PAL //kódování obrazu kamery
set osd_vbat_enable = ON //napětí všech článků baterie
set osd_rssi_enable = ON //síla signálu vysílačky
set osd_throttle_enable = ON //pozice páčky plynu
set osd_flightmode_enable = ON //zobrazení letového módu
set osd_video_rssi_enable = ON //síla vysílaného video signálu
set osd_messages_enable = ON //systémové zprávy
set osd_sidebar_enable = ON //svislá lišta náklonu dronu
set osd_attitude_indicator_enable = ON //vodorovná lišta náklonu
set osd_tim_1_enable = ON //zobrazení letového času (od armu)

#magnetometer
set osd_heading_enable = ON //směr letu dronu pomocí magnetometru

#barometer
set osd_altitude_enable = ON //funkce výšky barometru

#gps
set osd_gps_sats_enable = ON //počet právě připojených satelitů
set osd_gps_speed_enable = ON //rychlost letu dle GPS
set osd_home_distance_enable = ON //vzdálenost od domovského bodu
```

Po povolení zmíněných hodnot bylo provedeno jejich pozicování na obrazovku OSD (viz Obr. 44).



Obrázek 44 – náhled na nastavené OSD, zdroj: autor

7.8 Evaluace a dokončení konfigurace

Konfigurace byla kompletně dokončena nastavením funkce černé skříňky neboli blackboxu, který v průběhu letu ukládá data ze všech senzorů. Tyto logy mohou být následně využity k informativní činnosti či pro evaluaci provedeného letu za účelem kalibrování PID hodnot.

Vybraná letová jednotka SucceX-E F4 V2.1 má integrovanou paměť typu flash o velikosti **8MB**, na kterou je možné data černé skříňky ukládat. Blackbox byl nakonfigurován pomocí následujících příkazů:

```
set blackbox_device = ONBOARD_FLASH //ukládání dat na letovou jednotku
set blackbox_rate = 1000 //nastavení ukládání na 1 kHz = 1000krát/sec
```

Datové výstupy nasbírané při plnění testovacích misí budou podrobněji rozebrány v následující části práce. Pro tyto lety byly vybrány 5“ vrtule značky **Gemfan 51466 V2**. Akumulátor typu **CNHL Black Series 1300mAh** byl připevněn ve spodní části rámu dvěma bateriovými popruhy. Následně byla provedena zkouška video vysílání, kdy byly diverzitní brýle **EV800D** nastaveny na parametry vysílání (pásmo Raceband, kanál 1, frekvence 5658).

Fotografie z provedené zkoušky FPV systému i kompletně dokončené autonomní kvadrokoptéry (viz Obr. 45, 46).



Obrázek 45 – zkouška FPV systému, zdroj: autor



Obrázek 46 – detailní pohled na dokončenou konstrukci kvadroptéry s osazenými vrtulemi a akumulátorem, zdroj: autor

Před prvním testovacím letem byla kvadroptéra opatřena identifikačním štítkem dle platných nařízení ÚCL.

8 Praktická část – Testování autonomních letů kvadrokoptéry na komerčních trasách

Tato část práce se zaměřuje na testování autonomních letů dle tras, které byly vytvořeny v plánovači misí. Po vytvoření mise, jsou data exportována v souboru s příponou **MISSION**, přičemž se jedná o soubor typu **XML**, který obsahuje informace o jednotlivých waypointech, příklad zápisu:

```
<mission>
<missionitem no="1" action="WAYPOINT" lat="50.1792419" lon="15.8
280493" alt="10" parameter1="0" parameter2="0" parameter3="0"/>
</mission>
```

Z předchozího zápisu je patrné, že se jedná o položku mise s ID 1. Dále je možné zjistit, že se jedná o waypoint, který obsahuje zeměpisné souřadnice. Poslední zmíněnou položkou je alt="10", která udává výšku letu v daném bodě na 10 metrů. Tento XML soubor je následně nahrán do flash a **EEPROM** paměti letové jednotky. V jeden čas může být nahrána pouze jedna mise.

Po provedení letů byly data z černé skříňky rozkódována pomocí **iNav Blackbox Tools**⁴³ a jejich soubory s příponou GPX následně vizualizována pomocí aplikace **Google Earth Pro**.

Trasy byly vytvářeny na základě komerčních využití autonomních dronů. Testování letů probíhalo na třech trasách, kdy každá z nich simuluje jiné komerční využití z dané oblasti:

- **Zemědělská oblast** – aplikace chemického postřiku
- **Logistická oblast** – doručení dvou balíčků
- **Bezpečnostní monitoring** – 360° monitorování dvou objektů

Před vytvořením první mise musela být provedena sada příkazů v CLI, která ověří způsobilost kvadrokoptéry k autonomním letům.

⁴³ <https://github.com/iNavFlight/blackbox-tools>

```

set nav_wp_load_on_boot = OFF //vypnutí automatického spuštění mise
set nav_wp_safe_distance = 10000 //max. vzdálenost od prvního wp.
set osd_hud_wp_disp = 0 //počet zobrazených waypointů v OSD
set nav_mc_wp_slowdown = OFF //snížení rychlosti před waypointem
set failsafe_mission = ON //spuštění failsafe při vzniku chyby za letu

```

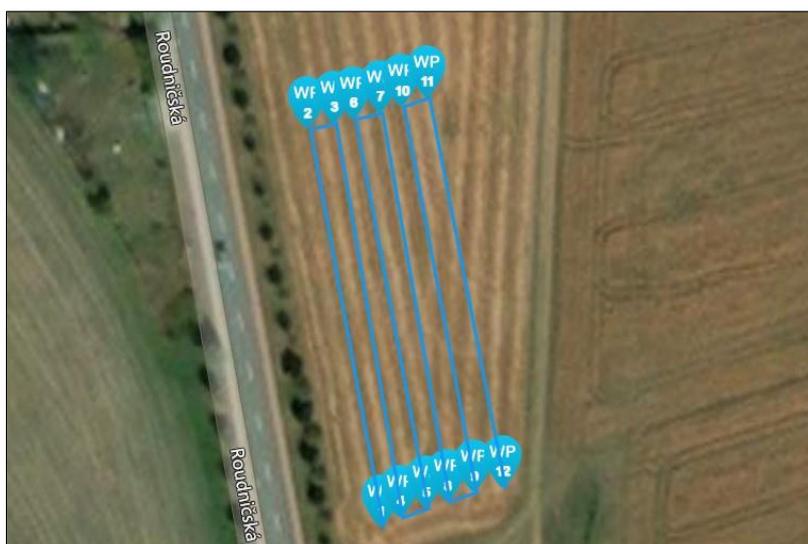
8.1 Aplikace plánovače misí pro trasu z oblasti zemědělství

Pro aplikaci plánovače misí v zemědělském sektoru byla vytvořena trasa pro simulaci aplikace chemického postřiku. Mise se skládá z **13 kontrolních waypointů**, přičemž má celkovou délku **453,2 metrů**. Výška letu byla nastavena na 10 metrů, rychlost letu na 2 m/s (7,2 km/h) a přesnost splnění waypointu na 1 m. Nastavení těchto parametrů a validace mise (viz Obr. 47).



Obrázek 47 – nastavení funkčních parametrů a validace zemědělské mise, zdroj: autor

Náhled na vytvořenou trasu z plánovače misí (viz Obr. 48).



Obrázek 48 – trasa pro simulaci aplikace chemického postřiku, zdroj: autor

Při testování letu mise bylo po zapojení baterie nalezeno osm satelitů, přičemž proběhl GPS fix, který je nutný pro vzlet kvadrokoptéry. Po manuálním vzletu byl aktivován mód **POS_HOLD**, který zafixoval kvadrokoptéru na její aktuální letové pozici (viz Obr. 49).



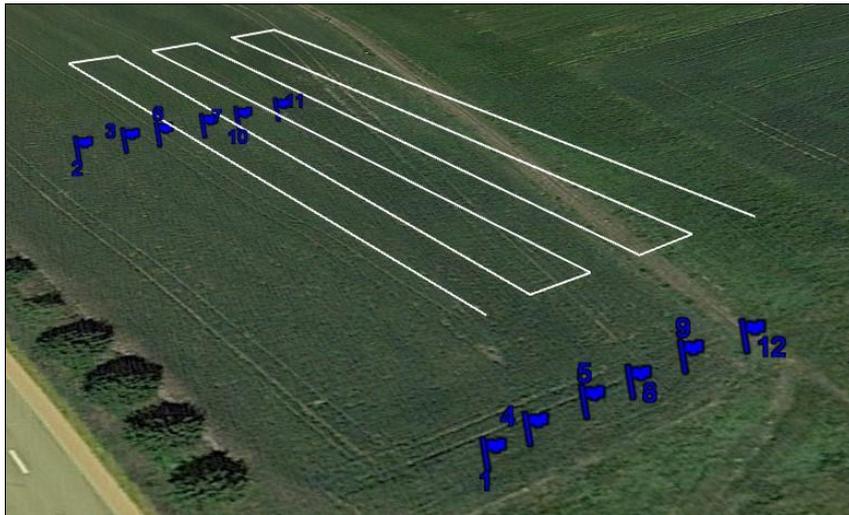
Obrázek 49 – náhled na DVR s aktivní funkcí POS_HOLD, zdroj: autor

Z obrázku je patrné, že dron autonomně drží svojí pozici. Dále je viditelný počet připojených satelitů, vzdálenost od domovského bodu, výška letu či natočení magnetometru na jih (177°). V pravé části obrázku je možné vidět letový čas společně se silou signálu vysílače i aktuálním počtem otáček motorů za sekundu.

Následným pohybem switche byla spuštěna mise, která proběhla kompletně bez komplikací s celkovým trváním letu **3 minuty a 52 sekund**. Na posledním waypointu byla po dokončení mise aktivována funkce **RTH**.

Po provedeném přistání byla rozebrána data z černé skříňky pomocí iNav Blackbox Tools, přičemž byl vyjmut soubor **aggro.GPX**, který byl vykreslen v Google Earth Pro.

Výsledek extrakce dat, které mapují provedenou dráhu letu (viz Obr. 50).

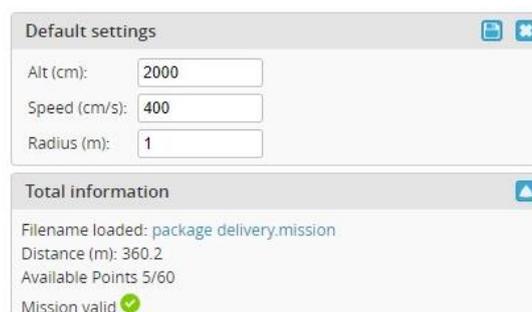


Obrázek 50 – výstup z blackboxu vizualizovaný ve 3D prostředí Google Earth, zdroj: autor

Z obrázku je patrné, že mise proběhla úspěšně přesně dle zadané trasy. Agent jakožto autonomní kvadrokoptéra následoval trasu vytvořenou pomocí GPS waypointů, přičemž jeho trajektorie byla stále korigována pomocí PID algoritmu, což mělo za následek vysoce přesný let. Nutno podotknout, že trasa letu byla testována v den s výbornými povětrnostními podmínkami.

8.2 Aplikace plánovače misí pro trasu z oblasti logistiky

Pro aplikaci plánovače misí v logistickém sektoru byla vytvořena trasa simulující doručení dvou balíčků. Mise je složena z **5 waypointů**, přičemž na třech z nich je aktivována funkce **LAND**, na posledním je aktivována funkce **RTH**. Celková vzdálenost provedené mise je **360,2 metrů**. Výška letu byla nastavena na 20 metrů, rychlost na 4 m/s (14,4 km/h) a tolerance splnění waypointu na 1 metr. Provedené nastavení a validace této mise (viz Obr. 51).



Obrázek 51 – nastavení doručovací mise a její validace, zdroj: autor

Z obrázku je patrné, že mise proběhla úspěšně. Agent jakožto autonomní kvadrokoptéra splnil trasu, přičemž třikrát přistál na dané GPS souřadnici. Průběh letu byl opět korigován pomocí iteračního PID algoritmu a vstupů, které byly získány ze senzorů.

8.3 Aplikace plánovače misí pro trasu z oblasti bezpečnostního monitoringu

Pro aplikaci plánovače misí v bezpečnostním sektoru byla vytvořena speciálně komplexní mise obsahující **21 waypointů**, přičemž u dvou z nich (2, 10) je spuštěna funkce **POI** (Point of Interest), kdy se kamera pomocí magnetometru soustředí na daný bod, který nemusí být v letové dráze. Na waypointech s číselným označením 5 a 11 byla aktivována funkce **PH_TIME=10**, kdy při dosažení tohoto waypointu kvadrokoptéra sečká 10 sekund a následně pokračuje v letové dráze. Na posledním waypointu je nastavena funkce **RTH**, která zahájí zpětný let na domovský bod. Celková vzdálenost trasy byla **1045,7 metrů**. Výška letu byla nastavena na 20 metrů, rychlost na 5 m/s (18 km/h) a tolerance splnění waypointu na 1 metr. Aplikované nastavení a validace trasy (viz Obr. 54).



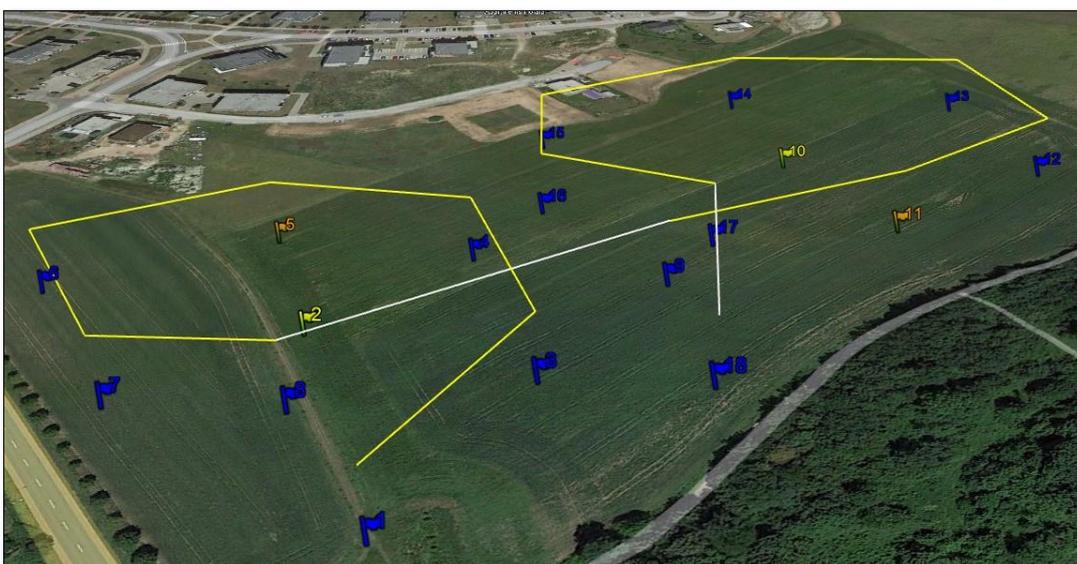
Obrázek 54 – nastavení monitorovací mise a její validace, zdroj: autor

Náhled na vytvořenou trasu pomocí plánovače misí (viz Obr. 55).



Obrázek 55 – trasa pro simulaci monitoringu dvou budov, zdroj: autor

Identickým způsobem jako u minulých misí bylo po zapojení baterie nutné posečkat na GPS fix. Po vzletu kvadrokoptéry byla aktivována funkce **POS_HOLD** a následně spuštěna mise. Při prvním průletu kvadrokoptéra ignorovala POI waypointy, přičemž po opětovné kalibraci magnetometru již proběhla mise bez komplikací. Celková doba letu byla **3 minuty a 32 sekund**. Po rozebrání dat z černé skříňky byl provedený let vykreslen pomocí Google Earth (viz Obr. 56).



Obrázek 56 – náhled na vizualizaci dat z černé skř. v prostředí Google Earth, zdroj: autor

Jak je již z náhledu patrné, let proběhl úspěšně. Autonomní kvadrokoptéra jakožto agent opět využívala PID algoritmu pro korekce vnějších vlivů společně se vstupy ze senzorů, které pomáhaly s jejím řízením. Po čas letu byla dvakrát směřována k POI waypointům, které simulovaly 360° monitoring budovy. Při dosažení waypointu 5 a 11 byla kvadrokoptéra stále ovlivněna POI, nicméně setrvala na dané pozici definovaných 10 sekund.

8.4 Obecná sumarizace nákladů na let kvadrokoptéry

V této práci byl pro provedené lety využit akumulátor CNHL 1300 mAh 6S 100C. Pro dosažení kompletního vybití bylo nutné provádět lety o délce 4–6 minut. Akumulátor byl po každém letovém testu znovu nabíjen. Průměrná cena elektřiny pro období 04/2023 je 5,18 Kč. Výpočtem spotřebované energie můžeme získat cenu za jedno nabití následovně:

$$SE = \left(\frac{1300mAh}{1000} \right) * \left(\frac{25,2V}{1000} \right) = 0,032 kWh$$

$$Cena = 0,032 * 5,18 = 0,17 Kč$$

Náklady na jedno dobití baterie při tarifu 5,18 Kč/kWh jsou pouze 0,17 Kč, což je zanedbatelná částka při uvážení množství odvedené práce.

9 Praktická část – Rozbor nákladů na konstrukci kvadrokoptéry, srovnání s již existujícími řešeními

Předmětem této části práce je rozbor nákladů na konstrukci vlastní autonomní kvadrokoptéry a následné porovnání s již existujícími řešeními, které jsou volně dostupné na trhu. Porovnání jednotlivých komponentů bude vyhodnocováno dle poměru cena/výkon s třemi cenově rozdílnými řešeními.

9.1 Rozbor nákladů na konstrukci kvadrokoptéry

Detailní rozbor jednotlivých cen součástí zkonstruovaného řešení se zdroj (viz Tabulka 23).

Tabulka 23 – Rozbor cen součástí zkonstruovaného řešení, zdroj: autor

Součástka	Model	Poč.	Reference	Cena vč. DPH
Hlavní komponenty kvadrokoptéry				
<i>Rám + GPS úchyt</i>	<i>3D tisk</i>	<i>1</i>	<i>Nylon/TPU</i>	<i>0</i>
<i>Letová jednotka</i>	<i>SucceX-E F4 V2.1</i>	<i>1</i>	<i>https://www.rotorama.cz/ridici-jednotky/iflight-succex-e-f4-flight-controller</i>	<i>1 299</i>
<i>Regulátor</i>	<i>SucceX-E 45A V2</i>	<i>1</i>	<i>https://www.rotorama.cz/ridici-jednotky/iflight-iflight-succex-e-45a-v2</i>	<i>1 589</i>
<i>Motory</i>	<i>XING-E Pro</i>	<i>4</i>	<i>https://www.rotorama.cz/motory/iflight-xing-e-pro-2207-1800kv</i>	<i>429</i>
<i>Přijímač</i>	<i>FrSky R-XSR</i>	<i>1</i>	<i>https://www.rotorama.cz/rc/frsky-r-xsr</i>	<i>690</i>
<i>Kabel baterie</i>	<i>XT60 14AWG</i>	<i>2</i>	<i>https://www.koptery.cz/doplňky/kabel-14awg/</i>	<i>19</i>
<i>Kondenzátor</i>	<i>470 µF 35V</i>	<i>1</i>	<i>https://www.koptery.cz/ostatni/kondenzator-35v-470uf--low-esr/</i>	<i>8</i>
Rozšíření o FPV systém				
<i>Kamera</i>	<i>Caddx Ratel 2</i>	<i>1</i>	<i>https://www.n4q.cz/caddx-ratel-2/</i>	<i>879</i>
<i>Video vysílač</i>	<i>SucceX Force</i>	<i>1</i>	<i>https://www.rotorama.cz/video-vysilace/iflight-succex-force</i>	<i>999</i>
Přídavné senzory zajišťující autonomii				
<i>GPS + Mag.</i>	<i>BN-880</i>	<i>1</i>	<i>https://www.koptery.cz/ostatni/bn-880-gps/</i>	<i>529</i>
<i>Cena komponentů celkem: 7 747 Kč</i>				

9.2 Srovnání vlastního řešení s již existujícími drony

Porovnání probíhalo na třech odlišných cenových hladinách. Jako zástupci byli vybrány následující kvadrokoptéry: **HGLRC Rekon5**⁴⁴ (Low-cost), **Diatone Roma F5 V2**⁴⁵ (Middle-cost), **iFlight Taurus X8 Pro**⁴⁶ (High-cost).

Náhled na vybrané kvadrokoptéry (viz Obr. 57).



Obrázek 57 – náhled na existující řešení různých cenových hladin,
zdroj: autor, obr. [59-61]

Celkové porovnání produktů bylo provedeno ve čtyřech stupních hodnocení, které jsou v následující tabulce barevně označeny (viz Tabulka 24).

Vysvětlivky jednotlivých barevných označení:

Dostačující či zastaralé řešení

Nejvíce efektivní řešení z hlediska poměru ceny a výkonu

Řešení střední cesty

Velmi kvalitní řešení s vysokou pořizovací cenou

⁴⁴ <https://rekonfpv.com/products/copy-of-rekon-5-mini-long-range-quad-analog-version>

⁴⁵ <https://www.6sfull.cz/diatone-roma-f5-v2-pnp-digital>

⁴⁶ <https://www.aliexpress.com/item/1005004090331192.html>

Tabulka 24 – Porovnání komponentů kvadrokoptér na základě výkonu a prodejní ceny, zdroj: autor

Součástka	Vlastní řešení	Low-cost	Middle-cost	High-cost
		HGLRC Rekon5	Diatone Roma F5 V2	iFlight Taurus X8 Pro
Hlavní komponenty kvadrokoptér				
Rám	3D tisk	Rekon 5" Frame	Roma F5 V2	Taurus X8
Letová jednotka	SucceX-E F4 V2.1	Zeus F722 Mini	MAMBA MK4 F722	BLITZ F7 Pro
Regulátor	SucceX-E 45A V2	Zeus 28A	MAMBA F55-128K	SucceX X80A
Motory	XING-E Pro	Rekon 2004 1800KV	MAMBA TOKA 2203 1770	XING2 3110 900KV
Přijímač	FrSky R-XSR	FrSky XM+	FrSky XM+	TBS Crossfire Nano
Kondenzátor	470 μ F 35V	1000 μ F 35V	470 μ F 35V	470 μ F 35V
Rozšíření o FPV systém				
Kamera	Caddx Ratel 2	Caddx Ratel 2	Caddx Micro	DJI FPV Camera
Video vysílač	SucceX Force	Zeus VTX 800mW	DJI FPV Air Unit	DJI FPV Air Unit
Přídavné senzory zajišťující autonomii				
GPS + Mag.	BN-880	M80	M22	iFlight M8Q-5883
Doba letu	4-6 minut	4-6 minut	8-10 minut	8-12 minut
Max. rychlost bez zatížení	138 km/h (měřeno)	120 km/h	100 km/h	160 km/h
Maximální letové zatížení	350 gramů	310 gramů	440 gramů	2 kg
Hmotnost bez akumulátoru	137,5 gramů	218,5 gramů	355 gramů	2,3 kg
Cena vč. DPH	7 747	5 740	13 469	68 935

Jak je již z tabulky patrné, mé řešení obstálo nejvíce v oblasti poměru cena/výkon, nicméně se zde nachází i několik komponentů z oblasti řešení střední cesty. Ačkoliv je má varianta lehce dražší nežli low-cost řešení, nabízí mnohem kvalitnější komponenty, a to zejména letovou jednotku, regulátor, motory, přijímač i video vysílač.

Z tabulky také vyplývá, že mé řešení by spíše mohlo být porovnáváno se střední cenovou relací, ačkoliv je toto řešení téměř dvakrát dražší. V této cenové relaci je již kvadrokoptéra osazena digitálním FPV systémem a vysoce kvalitními motory. Také osazený regulátor a letová jednotka mají přesnější senzory, více UART portů i větší flash paměť.

V sekci high-cost řešení bylo poukázáno na jednu z nejdražších FPV kvadrokoptér na trhu. Každopádně je také téměř desetkrát dražší nežli mé řešení. Je schopna autonomně vykonávat bezpečnostní, logistické či zemědělské práce a může být osazena high-end kamerami či přídatnými senzory, které jsou pro danou činnost nezbytné. Zmínění této kvadrokoptéry bylo spíše informativní, čímž bylo poukázáno na aktuální high-cost trend trhu dronů. Ačkoliv se má vlastní kvadrokoptéra tomuto řešení nemůže vyrovnat, stále funguje na stejných konstrukčních i softwarových principech.

10 Závěr

Touto diplomovou prací bylo poukázáno na problematiku autonomních bezpilotních systémů a jejich využívání v různých oblastech lidského působení. Byly také rozebrány jednotlivé algoritmy, které autonomní drony používají společně s komerčními využitími a trasami. Dle mého názoru je technologický pokrok za posledních pár let obrovský a domnívám se, že v blízké době by mohly být autonomní drony běžnou součástí našich každodenních životů. Každopádně jejich potenciál je značně limitován nynějšími regulacemi EU, které by musely být značně upraveny pro zajištění každodenního letového provozu. Tato práce byla vytvořena z důvodu nedostupnosti informací o autonomních FPV dronech v českém jazyce a je určena pro všechny zájemce o bezpilotní systémy.

Fyzickým výstupem z práce je autonomní 5“ kvadrokoptéra, využívající části, které byly vyrobeny pomocí 3D tisku. Součástky byly vybírány pro zachování nejvyšší míry ceny a výkonu. Při letových testech se vytištěný rám z **nylonu** osvědčil jako provozuschopný a plně funkční. Tento fakt poukazuje na možné budoucí nahrazení rámu karbonových.

Mezi hlavní výhody zkonstruovaného dronu patří provozní náklady, kdy jedno nabití baterie vychází pouze na 0,17 Kč. Tato částka je zanedbatelná v porovnání s množstvím odvedené práce ve všech sektorech. Další výhodou je rychlost letu, živý FPV přenos i velice nízké náklady na opravu.

Pokud tyto výhody převedeme na jednotlivé sektory, zjistíme, že statické a vysoce nákladné kamerové systémy, postřikové stroje i logistická vozidla, která zanechávají velkou uhlíkovou stopu, mohou být kompletně nahrazena ekologicky šetrnějšími autonomními drony.

Mezi hlavní nevýhody patří doba letu, která se pohybuje v řádu několika minut, nicméně s aktuálním technologickým postupem se domnívám, že tento problém bude brzy vyřešen.

Závěrem bych podotkl, že autonomní drony se stále vyvíjejí a jejich výrobci neustále přichází s novými efektivními řešeními. Osobně doufám, že jejich prozatím skrytý potenciál bude v blízké době plně využit.

11 Seznam použité literatury

- [1] A Brief History of Drones. In: *Imperial War Museums* [online] [cit. 15.11.2022]. Dostupné z: <https://www.iwm.org.uk/history/a-brief-history-of-drones>
- [2] RSHAFFER. A Not-So-Short History of Unmanned Aerial Vehicles (UAV). In: *Consortiq* [online]. 10. 6. 2020 [cit. 16.11.2022]. Dostupné z: <https://consortiq.com/uas-resources/short-history-unmanned-aerial-vehicles-uavs>
- [3] SINGH, Ishveena. *What's the difference between drones, UAS, UAV, and RPAS?* [online]. 2021 [cit. 18.11.2022]. Dostupné z: <https://dronedj.com/2021/12/07/drone-uav-uas-difference-explained/>
- [4] *What is autonomous AI? A guide for enterprises* [online]. 2022 [cit. 25.11.2022]. Dostupné z: <https://venturebeat.com/ai/what-is-autonomous-ai/>
- [5] Autonomous aircraft. In: *Wikipedia* [online]. 2022 [cit. 5.12.2022]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Autonomous_aircraft&oldid=1121202873#Unmanned_aerial_vehicles
- [6] Computer vision in AI drones | SuperAnnotate. In: [cit. 6.12.2022]. Dostupné z: <https://www.superannotate.com/blog/computer-vision-in-ai-drones>
- [7] *Image Segmentation: The Basics and 5 Key Techniques* [online] [cit. 25.12.2022]. Dostupné z: <https://datagen.tech/guides/image-annotation/image-segmentation/>
- [8] Your Guide to Computer Vision in Drone Technology. In: *Keymakr's Blog features the latest news and updates* [online]. 10. 5. 2021 [cit. 30.12.2022]. Dostupné z: <https://keymakr.com/blog/computer-vision-in-drone-technology/>
- [9] Skip Connections | All You Need to Know About Skip Connections. In: [cit. 01.01.2023]. Dostupné z: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/08/all-you-need-to-know-about-skip-connections/>
- [10] FUMO, Jose. Types of Machine Learning Algorithms You Should Know. In: *Medium* [online]. 17. 8. 2017 [cit. 01.01.2023]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/types-of-machine-learning-algorithms-you-should-know-953a08248861>
- [11] Understanding Loss Functions in Machine Learning. In: *Engineering Education (EngEd) Program | Section* [online] [cit. 08.01.2023]. Dostupné z: <https://www.section.io/engineering-education/understanding-loss-functions-in-machine-learning/>

- [12] What is Supervised Learning? | IBM. In: [cit. 15.01.2023]. Dostupné z: <https://www.ibm.com/topics/supervised-learning>
- [13] What is Unsupervised Learning? | IBM. In: [cit. 15.01.2023]. Dostupné z: <https://www.ibm.com/topics/unsupervised-learning>
- [14] *Semi-Supervised Learning, Explained with Examples* [online] [cit. 15.01.2023]. Dostupné z: <https://www.altexsoft.com/blog/semi-supervised-learning/>
- [15] BHATT, Shweta. Reinforcement Learning 101. In: *Medium* [online]. 19. 4. 2019 [cit. 16.01.2023]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/reinforcement-learning-101-e24b50e1d292>
- [16] M, Darshan. All you need to know about SARSA in Reinforcement Learning. In: *Analytics India Magazine* [online]. 30. 6. 2022 [cit. 17.01.2023]. Dostupné z: <https://analyticsindiamag.com/a-complete-intuition-on-sarsa-algorithm/>
- [17] DRONPRO. Pravidla pro létání s drony, aneb co vše s dronem (ne)smíte. In: *DronPro* [online] [cit. 20.01.2023]. Dostupné z: <https://dronpro.cz/pravidla-pro-letani-aneb-co-vse-s-dronem-ne-smite>
- [18] DRONPRO. Jednotná evropská legislativa pro drony: Co znamená pro české hobby a profi piloty? In: *DronPro* [online] [cit. 25.01.2023]. Dostupné z: <https://dronpro.cz/jednotna-evropska-legislativa-pro-drony-co-znamenava-pro-ceske-hobby-a-profi-piloty>
- [19] CLOUDFACTORY. Breaking Down The Levels of Drone Autonomy. In: [cit. 26.01.2023]. Dostupné z: <https://blog.cloudfactory.com/levels-of-drone-autonomy>
- [20] MCNABB, Miriam. *DRONEII: Tech Talk – Unraveling 5 Levels of Drone Autonomy* [online]. 2019 [cit. 27.01.2023]. Dostupné z: <https://dronelife.com/2019/03/11/droneii-tech-talk-unraveling-5-levels-of-drone-autonomy/>
- [21] KHAN, Asharul Islam a Yaseen AL-MULLA. Unmanned Aerial Vehicle in the Machine Learning Environment. *Procedia Computer Science*. 2019, roč. 160, s. 46–53. ISSN 1877-0509. DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.442
- [22] ENTERPRISE, D. J. I. The Use of Drones in Agriculture Today. In: [cit. 10.02.2023]. Dostupné z: <https://enterprise-insights.dji.com/blog/drones-in-agriculture>
- [23] Croptracker – Drone Technology In Agriculture. In: [cit. 11.02.2023]. Dostupné z: <https://www.croptracker.com/blog/drone-technology-in-agriculture.html>

- [24] KWAK, Geun-Ho a No-Wook PARK. Impact of Texture Information on Crop Classification with Machine Learning and UAV Images. *Applied Sciences*. 2019, roč. 9, s. 643. DOI: 10.3390/app9040643
- [25] Drone Logistics: How Drone Tech Is Shaking Up Supply Chains. In: [cit. 15.02.2023]. Dostupné z: <https://www.rasmussen.edu/degrees/business/blog/drone-logistics/>
- [26] ÇETIN, Ender et al. *Drone Navigation and Avoidance of Obstacles Through Deep Reinforcement Learning*. 2019. DOI: 10.1109/DASC43569.2019.9081749
- [27] KOCH, William et al. Reinforcement Learning for UAV Attitude Control. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2019, roč. 3, č. 2, s. 1–21. ISSN 2378-962X, 2378-9638. DOI: 10.1145/3301273
- [28] SONG, Yunlong et al. *Autonomous Drone Racing with Deep Reinforcement Learning* [online]. arXiv, 2021 [cit. 20.02.2023]. Dostupné z: <http://arxiv.org/abs/2103.08624>
- [29] Drone for Security & Surveillance: Benefits, Use cases, and More. In: *JOUAV* [online] [cit. 25.02.2023]. Dostupné z: <https://www.jouav.com/industry/security-surveillance>
- [30] Surveillance and Security Drone | AirborneDrones. In: *Airborne Drones* [online] [cit. 27.02.2023]. Dostupné z: <https://www.airboredrones.co/surveillance-and-security/>
- [31] PATRINOPOULOU, Niki et al. A Multi-Agent System Using Decentralized Decision-Making Techniques for Area Surveillance and Intruder Monitoring. *Drones*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, roč. 6, č. 11, s. 357. ISSN 2504-446X. DOI: 10.3390/drones6110357
- [32] OSCAR. A Comprehensive Guide to FPV Drone Frame. In: *Oscar Liang* [online]. 05. 03. 2023 [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: <https://oscarliang.com/fpv-drone-frames/>
- [33] OSCAR. Flight Controller Explained: The Ultimate Guide to Understanding FPV Drone Control Systems. In: *Oscar Liang* [online]. 28. 2. 2023 [cit. 7.03.2023]. Dostupné z: <https://oscarliang.com/flight-controller-explained/>
- [34] OSCAR. FPV Drone PID Explained. In: *Oscar Liang* [online]. 8. 9. 2022 [cit. 8.03.2023]. Dostupné z: <https://oscarliang.com/pid/>
- [35] *Regulátory* [online] [cit. 9.03.2023]. Dostupné z: <https://live.rotorama.cz/tutorial/komponenty/regulatory/>

- [36] *Motory* [online] [cit. 10.03.2023]. Dostupné z: <https://live.rotorama.cz/tutorial/komponenty/motory/>
- [37] *Vysílačka a přijímače* [online] [cit. 11.03.2023]. Dostupné z: <https://live.rotorama.cz/tutorial/komponenty/vysilacka-a-prijimace/>
- [38] *Akumulátory a nabíjení* [online] [cit. 12.03.2023]. Dostupné z: <https://live.rotorama.cz/tutorial/akumulatory-a-nabijeni/>
- [39] *Kamery* [online] [cit. 13.03.2023]. Dostupné z: <https://live.rotorama.cz/tutorial/komponenty/kamery/>
- [40] *Video vysílače* [online] [cit. 13.03.2023]. Dostupné z: <https://live.rotorama.cz/tutorial/komponenty/video-vysilace/>
- [41] OSCAR. How to Setup GPS in Betaflight. In: *Oscar Liang* [online]. 14. 1. 2023 [cit. 14.03.2023]. Dostupné z: <https://oscarliang.com/gps-mini-quad/>
- [42] DRONY, Eko. LIDAR – Eko Drony. In: *eko-drony.cz* [online]. 11. 5. 2022 [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: <https://www.eko-drony.cz/radce/lidar/>
- [43] component.jpg (951×474). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: https://static.packt-cdn.com/products/9781788629416/graphics/B08956_02_11.jpg
- [44] residual-block-300x208.png (300×208). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: <https://cdn.analyticsvidhya.com/wp-content/uploads/2021/06/residual-block-300x208.png>
- [45] U-Net-architecture-The-gray-arrows-represent-the-skip-connections-from-encoder-to-the.png (850×550). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/323770954/figure/fig3/AS:631597221044226@1527595920172/U-Net-architecture-The-gray-arrows-represent-the-skip-connections-from-encoder-to-the.png>
- [46] regression-vs-classification-in-machine-learning.png (625×348). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: <https://static.javatpoint.com/tutorial/machine-learning/images/regression-vs-classification-in-machine-learning.png>
- [47] association.jpg (339×237). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0957417417307303-gr14.jpg>
- [48] k-means-copy.jpg (1318×906). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: <https://media.geeksforgeeks.org/wp-content/uploads/k-means-copy.jpg>
- [49] Dimensional reduction. In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f5/GaussianScatterPCA.svg>

- [50] 22_SARSA_vs_Q_Learning.png (1562×524). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: https://wikidocs.net/images/page/169313/22_SARSA_vs_Q_Learning.png
- [51] flight-controller.jpg (1001×1001). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: https://www.rotorama.cz/assets/images/e061980649316632a825a93372eae297/8325-1001_1001.jpg
- [52] esc.png (1000×1000). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: https://www.rotorama.cz/assets/images/37b2ab406951323000ed0532aba8c92b/8985-1000_1000.png
- [53] brushless-motor.jpg (1001×1001). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: https://www.rotorama.cz/assets/images/cfc4dcfdc552b517ee09033e6ff3bc88/8845-1001_1001.jpg
- [54] FrSky R-XSR.jpg (1001×1001). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: <https://www.quadkart.in/wp-content/uploads/2020/06/HTB1JLfiCYBuNkSnaVq6AMsVXal.jpg>
- [55] battery.jpg (800×800). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: https://www.rotorama.cz/assets/images/d7a6a78ee6f4b314b6a701421fc68cfc/7177-800_800.jpg
- [56] fpv-camera.jpg (1024×768). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: https://cdn.myshoptet.com/usr/www.n4q.cz/user/shop/big/1632-3_8470cfc7-9198-49f4-b245-c82f6e27ea91.jpg?632ce0e3
- [57] video-transmitter.jpg (1000×1000). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: https://www.rotorama.cz/assets/images/c4e80aca4b9b2f67aea33b67e1c4ac63/6329-1000_1000.jpg
- [58] gps-beitian.jpg (1500×1500). In: [cit. 15.03.2023]. Dostupné z: https://www.rotorama.cz/assets/images/0fa3ba288e811f8f5703115de5ce3cb5/4828-1500_1500.jpg
- [59] Rekon-5-Mini-Long-Range-Quad-Digital-Version-2.jpeg (1000×1000). In: [cit. 10.04.2023]. Dostupné z: <https://www.drone24hours.com/wp-content/uploads/2021/09/Rekon-5-Mini-Long-Range-Quad-Digital-Version-2.jpeg>
- [60] Diatone-Roma. In: [cit. 10.04.2023]. Dostupné z: https://cdn.myshoptet.com/usr/www.6sfull.cz/user/shop/big/2838_1-d6896a53-4aa5-4838-9682-7b84d3bc5437-1200x1200.jpg?63a2087b
- [61] iFlight-Taurus-X8-Pro-8S-HD-14.jpg (1000×1000). In: [cit. 10.04.2023]. Dostupné z: <https://www.drone24hours.com/wp-content/uploads/2022/06/iFlight-Taurus-X8-Pro-8S-HD-14.jpg>

- [62] Kompletní znění Doplnku X [online]. Řízení letového provozu ČR [cit. 11.04.2023]. Dostupné z:
<https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L2/data/effective/doplX.pdf>
- [63] Kategorizace provozu UAV [online]. In: [cit. 11.04.2023]. Dostupné z:
<https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2022/08/uasCZ.pdf>

12 Přílohy

Příloha 1 – Kompletní znění Doplnku X, předpisu L2 [62]

Příloha 2 – Kategorizace provozu bezpilotních systémů dle Evropské legislativy [63]

Příloha 3 – Technická specifikace 3D vytištěných komponentů, zdroj: autor

Příloha 4 – Finální fotografie dokončené konstrukce, zdroj: autor

ČR:

DOPLNĚK X – BEZPILOTNÍ SYSTÉMY

(Poznámka: viz Hlava 3, ust. 3.1.9 tohoto předpisu)

1. Definice

Výrazy použité v tomto doplňku mají následující význam:

Autonomní letadlo

Bezpilotní letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu.

Bezpilotní letadlo (UA)

Letadlo určené k provozu bez pilota na palubě.

Poznámka: V mezinárodním kontextu se jedná o nadřazenou kategorii dálkově řízených letadel, autonomních letadel i modelů letadel; pro účely tohoto doplňku se bezpilotním letadlem rozumí všechna bezpilotní letadla kromě modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 25 kg.

Bezpilotní systém (UAS)

Systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat. Bezpilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více.

Model letadla

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

2. Rozsah působnosti

2.1 Tento doplněk stanovuje závazné národní požadavky na projektování, výrobu, údržbu, změny a provoz bezpilotních systémů nespádajících do oblastí působnosti nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139 ze dne 4. července 2018 o společných pravidlech v oblasti civilního letectví a o zřízení Agentury Evropské unie pro bezpečnost letectví, kterým se mění nařízení (ES) č. 2111/2005, (ES) č. 1008/2008, (EU) č. 996/2010, (EU) č. 376/2014 a směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/30/EU a 2014/53/EU a kterým se zrušuje nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 552/2004 a (ES) č. 216/2008 a nařízení Rady (EHS) č. 3922/91 v platném znění (dále jen „základní nařízení“).

Tento doplněk dále stanovuje závazné národní požadavky na projektování, výrobu, údržbu, změny a provoz bezpilotních systémů pro modely letadel s maximální vzletovou hmotností 25 kg a větší, které spadají do oblastí působnosti základního nařízení, ale kterým je ve smyslu Čl. 21 odst. 3 dovoleno pokračovat v souladu s vnitrostátními pravidly aplikovanými před datem 1. 1. 2022, zejména pak

s tímto doplňkem, a bez oprávnění podle Čl. 16 základního nařízení do 1. ledna 2023.

Tento doplněk je dále doporučeným postupem pro provoz modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 25 kg, které spadají do oblastí působnosti základního nařízení, ale kterým je ve smyslu Čl. 21 odst. 3 dovoleno pokračovat v souladu s vnitrostátními pravidly aplikovanými před datem 1. 1. 2022, zejména pak s tímto doplňkem, a bez oprávnění podle Čl. 16 základního nařízení do 1. ledna 2023.

2.2 Odchylně od ust. 2.1 se ust. 7, Prostory, použije i pro modely letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 25 kg.

Poznámka 1: Pravidla pro provoz volných balónů bez pilota na palubě se zátěží jsou uvedena v Hlavě 3 a dodatku 5 tohoto předpisu. Pravidla pro provoz volných balónů bez pilota na palubě bez zátěže a upoutaných balónů bez pilota na palubě jsou uvedena v doplňku R tohoto předpisu.

Poznámka 2: Maximální vzletovou hmotností bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla se rozumí hmotnost včetně vybavení, provozních náplní, paliva a případného nákladu před zahájením vzletu nebo maximální vzletová hmotnost bezpilotního letadla schválená v rámci povolení k létání vydaného Úřadem pro civilní letectví (dále jen ÚCL), bylo-li toto povolení vydáno.

3. Bezpečnost

3.1 Let bezpilotního letadla smí být prováděn jen takovým způsobem, aby nedošlo k ohrožení bezpečnosti létání ve vzdušném prostoru, osob a majetku na zemi a životního prostředí.

3.2 Zákaz ohrožení bezpečnosti létání ve vzdušném prostoru se neuplatňuje vzájemně mezi modely letadel za předpokladu předchozí dohody zúčastněných pilotů a osob a přijetí přiměřených opatření proti ohrožení bezpečnosti ostatního letového provozu a na ochranu osob a majetku na zemi.

4. Dohled pilota

S výjimkou, kdy ÚCL povolí jinak, musí být bezpilotní letadlo provozováno v přímém dohledu pilota, tj. takovým způsobem a do takové vzdálenosti, aby:

- pilot během pojiždění a letu mohl udržovat trvalý vizuální kontakt s bezpilotním letadlem i bez vizuálních pomůcek jiných než brýle a kontaktní čočky na lékařský předpis; a
- pilot, nebo kromě pilota i poučená osoba, mohl sledovat a vyhodnocovat dohlednost, překážky a okolní letový provoz.

5. Odpovědnost

5.1 Za provedení bezpečného letu, včetně předletové přípravy a kontroly, je odpovědná osoba,

kteřá bezpilotní letadlo dálkově řídí (bez ohledu na úroveň automatizace systému řízení letu) nebo v případě modelu letadla s maximální vzletovou hmotností do 25 kg, který není dálkově říditelný, osoba, která jej vypustila do vzdušného prostoru (pro účely tohoto doplňku dále jen „pilot“).

5.2 Pilot odpovídá za to, že:

- a) bezpilotní systém bude používán pouze k účelu, ke kterému byl navržen a vyroben, případně, k němuž byl schválen ÚCL; a
- b) bude provozovat pouze bezpilotní systém, jehož způsob použití a technické parametry jsou v souladu s požadavky, které tento doplněk obsahuje, nestanoví-li ÚCL jinak.

5.3 Vlastník nebo provozovatel bezpilotního systému nebo pilot musí na žádost ÚCL umožnit provedení kontroly provozu a letové způsobilosti bezpilotního systému v rozsahu dle požadavku ÚCL.

5.4 Pilot musí zaznamenávat informace o letu do deníku letadla nebo rovnocenného dokumentu. Informace musí obsahovat datum letu, jméno pilota, označení letadla, místa vzletu a přistání, dobu letu a celkovou dobu letu, druh letové činnosti a potenciální události související s bezpečností letu.

5.5 Za zachování letové způsobilosti bezpilotního systému je odpovědný jeho vlastník.

5.6 Řízení bezpilotního letadla, jehož pilot podléhá evidenci ÚCL, nesmí být předáno osobě, která není evidována ÚCL:

- a) pro daný typ a modelovou řadu nebo dané označení bezpilotního letadla v případě využití k leteckým pracím a leteckým činnostem pro vlastní potřebu;
- b) pro danou kategorii (balón, vzducholoď, vrtulník, kluzák, letoun vrtulový, letoun proudový) v případě využití rekreačně-sportovního.

6. Ukončení letu

6.1 Bepilotní letadlo musí a model letadla s maximální vzletovou hmotností 0,91 kg až 25 kg by měl pilotovi umožnit za okolností, které by mohly vést k ohrožení dle ust. 3, zasáhnout do průběhu letu nebo let ukončit.

6.2 Pilot modelu letadla s maximální vzletovou hmotností menší než 0,91 kg, které není dálkově říditelné, by měl provést předletovou přípravu k zajištění bezpečného letu, spočívající zejména ve zhodnocení místních podmínek a v nastavení odpovídajícího charakteru a doby letu.

6.3 Bepilotní letadlo s maximální vzletovou hmotností větší než 0,91 kg musí být vybaveno vestavěným bezpečnostním systémem, který při poruše provede ukončení letu.

6.4 Použití automatických systémů řízení letu nezbavuje pilota odpovědnosti za bezpečné provedení celého letu.

7. Prostory

7.1 Nepovolí-li ÚCL jinak, smí být let bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla prováděn jen v následujících prostorech:

- a) ve vzdušném prostoru třídy G (viz obrázek 1);
- b) v letištní provozní zóně (ATZ) anebo v aktivované oblasti s povinným radiovým spojením (dále jen RMZ) neřízeného letiště na základě splnění podmínek stanovených provozovatelem letiště a na základě koordinace s letištní letovou informační službou (dále jen AFIS), se stanovištěm poskytování informací známému provozu nebo s provozovatelem letiště, není-li AFIS nebo poskytování informací známému provozu zajištěno. Nad vzdušným prostorem třídy G v ATZ lze lety provádět, jen pokud se poskytuje AFIS nebo je zajištěno poskytování informací známému provozu. Let bezpilotního letadla anebo modelu letadla s maximální vzletovou hmotností do 0,91 kg může být prováděn v ATZ i bez koordinace, avšak pouze do výšky 100 metrů nad zemí a mimo ochranná pásma daného letiště (viz obrázek 1). Pro lety v aktivované RMZ musí být zajištěno oboustranné radiové spojení;
- c) v řízeném okrsku (CTR a MCTR) letiště do výšky 100 metrů nad zemí, s výjimkou povolení příslušného stanoviště řízení letového provozu a v horizontální vzdálenosti větší než 5 500 m od vztažného bodu řízeného letiště, s výjimkou, kdy tak povolí ÚCL nebo v případě leteckých prací a leteckých veřejných vystoupení na základě koordinace s příslušným stanovištěm řízení letového provozu a provozovatelem letiště. Let bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla s maximální vzletovou hmotností do 0,91 kg může být prováděn v řízeném okrsku bez koordinace i v menší vzdálenosti od letiště, avšak pouze do výšky 100 metrů nad zemí a mimo ochranná pásma daného letiště (viz obrázek 2).

7.2 Při provozu bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla v CTR a MCTR ve vzdálenosti větší než 5 500 m od vztažného bodu letiště a současně ve výšce nižší než 100 m nad zemí a při provozu bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla s maximální vzletovou hmotností do 0,91 kg ve vzdálenosti menší než 5 500 m od vztažného bodu letiště, do výšky 100 metrů nad zemí a mimo ochranná pásma letiště se neuplatňují požadavky předpisu L 11 na získání letového povolení a na stálé obousměrné spojení se stanovištěm řízení letového provozu a požadavky stanovené Leteckou informační příručkou ČR (AIP) na vybavení odpovídačem sekundárního radaru. Při provozu bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla v CTR a MCTR ve vzdálenosti menší než 5 500 m od vztažného bodu letiště, kromě provozu bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla s maximální vzletovou hmotností do 0,91 kg mimo ochranná pásma letiště, nebo ve výšce vyšší než 100 m nad zemí je rozhodnutí o použitelnosti v tomto ustanovení uvedených požadavků ponecháno na uvážení příslušného stanoviště řízení letového provozu.

7.3 Minimální výšky letu dle Hlavy 4, ust. 4.6 a doplňku O, ust. 2.3.3 tohoto předpisu se pro lety bezpilotních letadel a modelů letadel neuplatňují.

7.4 Provoz bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla nesmí být prováděn v zakázaných, nebezpečných a jiným uživatelem aktivovaných omezených, rezervovaných a vyhrazených prostorech s výjimkou, kdy tak povolí ÚCL.

7.5 Žadatel o využití vzdušného prostoru postupuje v souladu s postupy uvedenými v AIP, část ENR 1.1.9.

7.6 Autonomní bezpilotní letadlo nesmí být provozováno ve společném vzdušném prostoru.

Poznámka: K předletové přípravě lze využít praktický mapový nástroj AisView Letecké informační služby (LIS) Řízení letového provozu ČR, s.p. na webových stránkách <http://lis.rlp.cz>.

8. Ochranná pásma

S výjimkou, kdy tak povolí ÚCL na základě předchozího souhlasu příslušného správního orgánu či oprávněné osoby, se let bezpilotního letadla nesmí provádět v ochranných pásmech stanovených příslušnými právními předpisy podél nadzemních dopravních staveb, tras nadzemních inženýrských sítí, tras nadzemních telekomunikačních sítí, uvnitř zvláště chráněných území, v okolí vodních zdrojů a objektů důležitých pro obranu státu. Nad těmito ochrannými pásmy smí být let prováděn pouze způsobem vylučujícím jejich narušení za běžných i mimořádných okolností.

9. Meteorologická minima

Let bezpilotního letadla smí být ve vzdušném prostoru třídy G prováděn jen vně oblaků a ve vzdušném prostoru jiné třídy jen v minimální vzdálenosti od oblaků 1 500 m horizontálně a 300 m vertikálně. Ustanovení 2.2.12, doplňku O tohoto předpisu se v případě bezpilotních letadel neuplatňuje.

10. Nebezpečný náklad

Bezpilotní letadlo nesmí být použito k přepravě nebezpečných látek nebo zařízení, která by mohla způsobit obecné ohrožení, kromě provozních náplní v množství přiměřeném účelu letu.

11. Shazování nákladu

Bezpilotní letadlo nesmí být použito ke shazování předmětů za letu, kromě leteckých veřejných vystoupení a soutěží, včetně příprav na ně, jsou-li přijata přiměřená opatření proti ohrožení dle ust 3.

12. Pohyb pilota

Bezpilotní letadlo nesmí být bez povolení ÚCL provozováno při současném pohybu pilota pomocí technického zařízení.

13. Letecká veřejná vystoupení

Letecká veřejná vystoupení (dále jen LVV) bezpilotních letadel podléhají souhlasu ÚCL. Požadavky na provozování LVV s výhradní účastí bezpilotních letadel, včetně modelů letadel s maximální vzletovou hmotností větší než 25 kg, stanovuje směrnice ÚCL CAA/S-SP-022-n/2020.

Podmínky pro LVV letadel s pilotem na palubě včetně účasti bezpilotních letadel stanovuje dokument ÚCL CAA-SL-101-n/16.

14. Ostatní legislativa

Provoz bezpilotního letadla musí být v souladu s platnými právními předpisy jako např.: Zákon o nakládání s bezpečnostním materiálem č. 310/2006 Sb., Zákon o ochraně veřejného zdraví č. 258/2000 Sb., Zákon o chemických látkách a chemických přípravcích č. 356/2003 Sb., Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb., Zákon o požární ochraně č. 133/1985 Sb., Zákon o vodách č. 245/2001 Sb., Zákon o životním prostředí č. 17/1992 Sb., ve znění pozdějších předpisů a v souladu se stanoviskem Úřadu pro ochranu osobních údajů č. 1/2013.

15. Pohon

K provozu bezpilotního letadla nesmí být použit pulzační nebo raketový motor, s výjimkou použití raketového pohonu pouze za účelem provedení vzletu.

16. Další podmínky pro provoz bezpilotního letadla

Při provozu bezpilotního letadla musí být dodrženy následující podmínky (pro přehlednost uvedené v Tabulce 1 níže, dále jen „tabulka“):

- a) bezpilotní letadlo podléhá evidenci ÚCL, jak vyplývá z řádku č. 1 tabulky;
- b) pilot bezpilotního letadla podléhá evidenci ÚCL, jak vyplývá z řádku č. 2 tabulky;
- c) podmínkou evidence pilota je prokázání základní schopnosti bezpečně řídit bezpilotní letadlo a požadovaného rozsahu teoretických znalostí, které stanoví ÚCL, jak vyplývá z řádku č. 3 tabulky;
- d) podmínkou provozu bezpilotního systému je povolení k létání vydané ÚCL, jak vyplývá z řádku č. 4 tabulky. Povolení k létání nahrazuje doklad o osvědčení letové způsobilosti a je dokladem o evidenci bezpilotního systému. Povolení k létání obsahuje seznam evidovaných pilotů a nahrazuje tak průkaz způsobilosti pilota;
- e) podmínkou provozování leteckých prací (LP) a leteckých činností pro vlastní potřebu (LČPVP) je povolení k provozování těchto činností vydané ÚCL, jak vyplývá z řádku č. 5 tabulky;
- f) bezpilotní letadlo musí být označeno ohnivzdorným identifikačním (ID) štítkem se jménem a telefonním číslem provozovatele a poznávací značkou, byla-li přidělena, jak vyplývá z řádku č. 6 tabulky;
- g) jak vyplývá z řádku č. 7 tabulky, bezpilotní letadlo se, s výjimkou kdy ÚCL povolí jinak, nesmí:
 - i) v průběhu vzletu a přistání přiblížit k jakékoliv osobě jiné než jeho pilot na horizontální vzdálenost menší než 50 m;
 - ii) za letu přiblížit k jakékoliv osobě, prostředku nebo stavbě, které nejsou součástí předmětného provozu, na horizontální vzdálenost menší než 100 m;

<p>iii) za letu přiblížit k jakémukoliv hustě osídlenému prostoru na horizontální vzdálenost menší než 150 m.</p> <p>Minima uvedená pod body i) a ii) se nevztahují na osoby přímo zapojené do provozu bezpilotních systémů za předpokladu předchozí dohody zúčastněných pilotů a osob. V těchto případech musí být přijata přiměřená opatření proti ohrožení dle ust. 3.</p> <p>Bezpečnou vzdáleností v tabulce se rozumí taková horizontální vzdálenost, která i v případě nastalé nouzové situace vyloučí možnost ohrožení dle ust. 3.</p> <p>h) minimální výše pojistné částky, na kterou musí být sjednáno individuální nebo hromadné pojištění odpovědnosti za škodu způsobenou provozem bezpilotního letadla (limit plnění) je uvedena v řádce č. 8 tabulky pro běžný provoz a LVV;</p> <p>i) projektování, výroba a počáteční letové zkoušky musí být dozorovány ÚCL, případně ÚCL pověřenou osobou, dle stanovených postupů, jak vyplývá z řádku č. 9 tabulky;</p>	<p>j) bezpilotní letadlo musí být vybaveno vestavěným bezpečnostním systémem („failsafe“ systém), který při selhání řídicího a kontrolního spoje provede ukončení letu, jak vyplývá z řádku č. 10 tabulky;</p> <p>k) žadatel o povolení k létání bezpilotního letadla k jiným, než rekreačně-sportovním účelům je povinen k žádosti doložit provozní příručku UAS, jak vyplývá z řádku č. 11 tabulky;</p> <p>l) události spojené s provozem bezpilotního letadla podléhají hlášení dle ust. 17 tohoto doplňku, jak vyplývá z řádku č. 12 tabulky.</p> <p>17. Hlášení událostí</p> <p>17.1 Povinnost hlásit události spojené s bezpilotním letadlem se vztahuje na všechna bezpilotní letadla se schválenou konstrukcí a/nebo letadla s provozním povolením (viz Tabulka č. 1). <i>Poznámka: Pro účely ust. 17.1 se za událost považují letecká nehoda, incident nebo vážný incident (definice těchto pojmů viz předpis L 13).</i></p> <p>17.2 Způsob hlášení událostí je stanoven v ust. 4.12 předpisu L 13.</p>
---	---

Legenda k obrázkům 1 a 2:

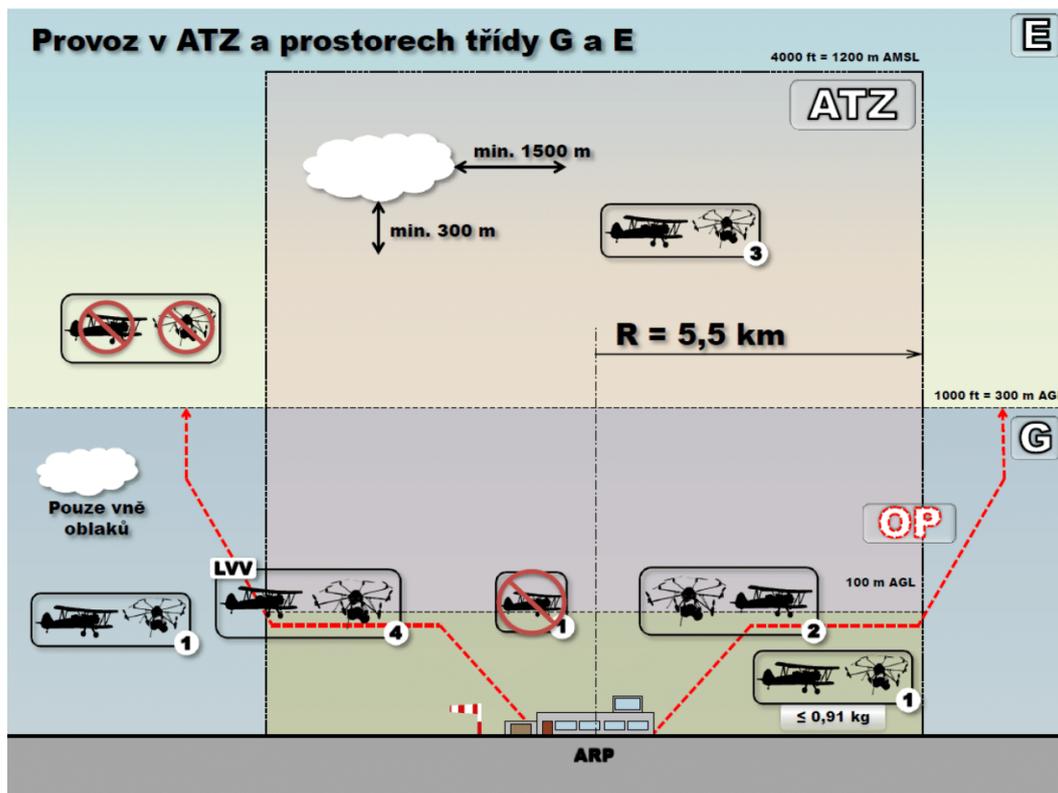
Modely letadel s maximální vzletovou hmotností do 25 kg



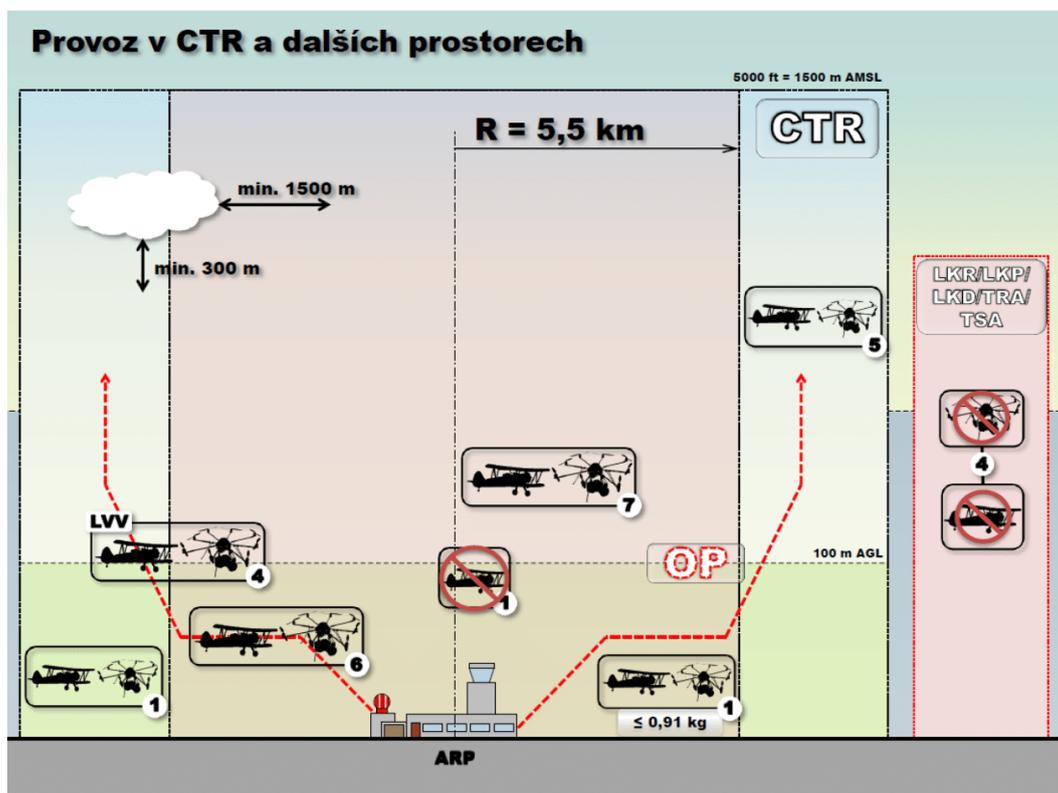
Bezpilotní letadla (tj. včetně modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nad 25 kg)

CTR	Řízený okresek letiště	LKR	Omezený prostor
ATZ	Letištní provozní zóna neřízeného letiště	LKP	Zakázaný prostor
OP	Ochranná pásma letišť	LKD	Nebezpečný prostor
G / E	Označení třídy vzdušného prostoru	TSA	Dočasně vyhrazený prostor
ARP	Vztažný bod letiště	TRA	Dočasně vymezený prostor
AMSL	Nadmořská výška	AGL	Nad úrovní země

1	Lety bez koordinace
2	Splnění podmínek provozovatele letiště (PL) + koordinace s letištní informační službou (AFIS)
3	Splnění podmínek PL + koordinace s AFIS
4	Souhlas/povolení ÚCL
5	Letové povolení příslušného stanoviště řízení letového provozu (ŘLP). ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru
6	Povolení ÚCL (nebo v případě leteckých prací (LP) koordinace s ŘLP + koordinace s PL). ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru
7	Povolení ÚCL (nebo v případě LP koordinace s ŘLP + koordinace s PL) + letové povolení ŘLP. ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru



Obrázek 1



Obrázek 2

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

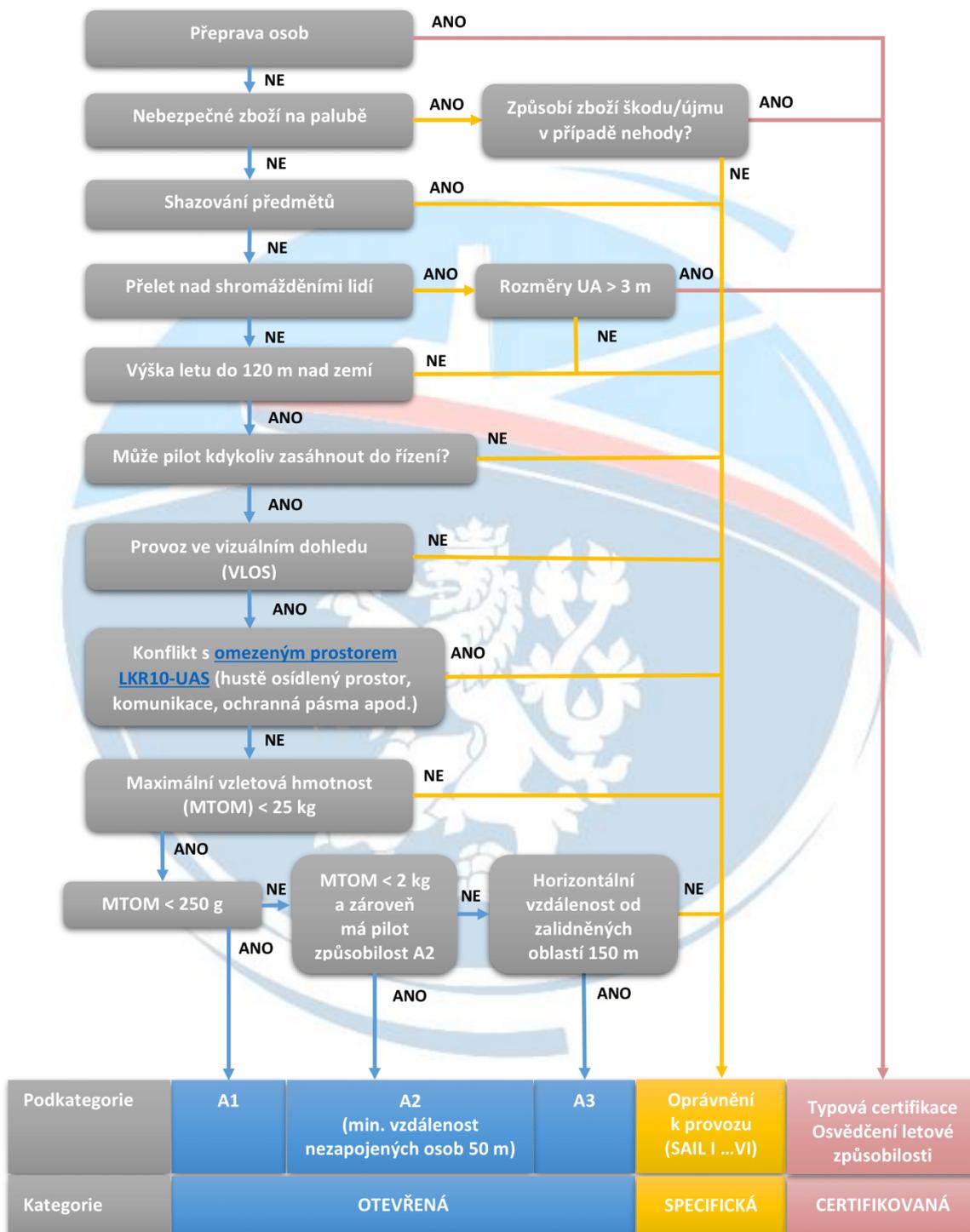
ZÁMĚRNĚ NEPOUŽITO

¹ Nař. č. 785/2004 označuje nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 785/2004 o pojištění provozovatelů letadel, v platném znění



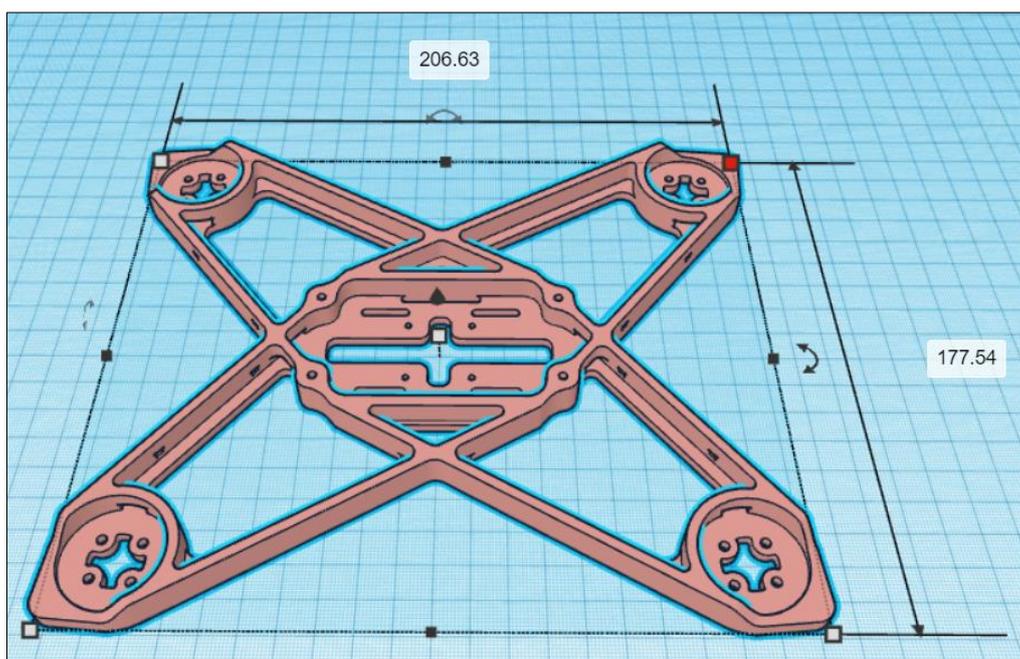
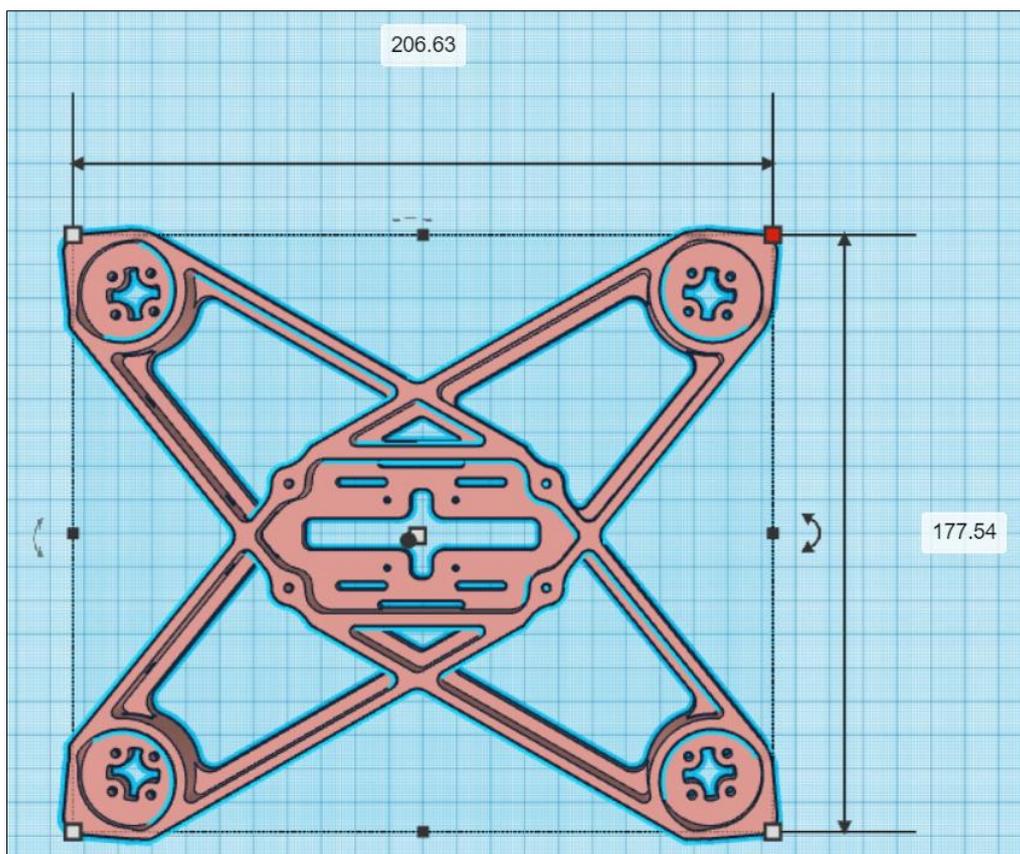
Kategorizace provozu bezpilotních systémů

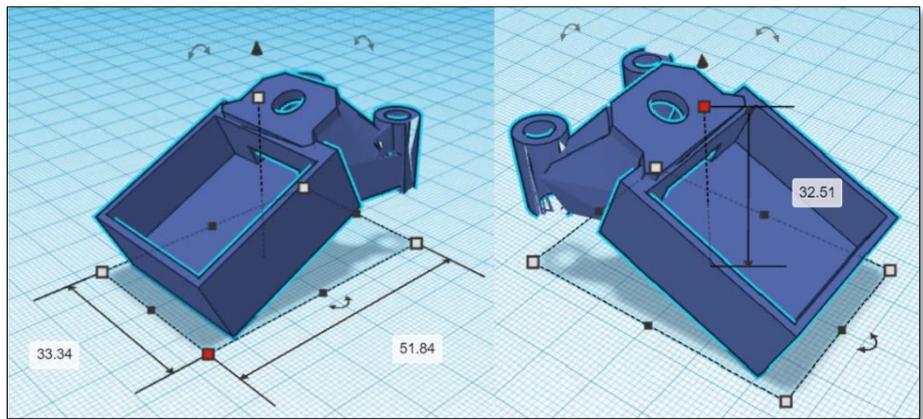
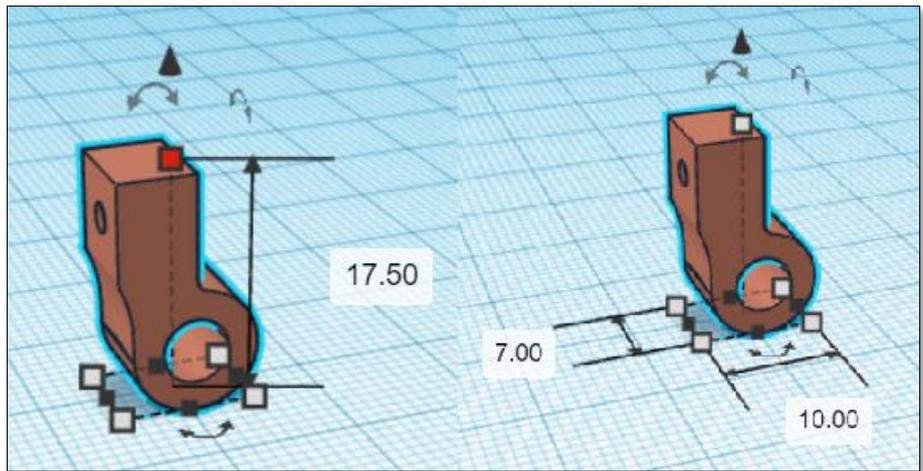
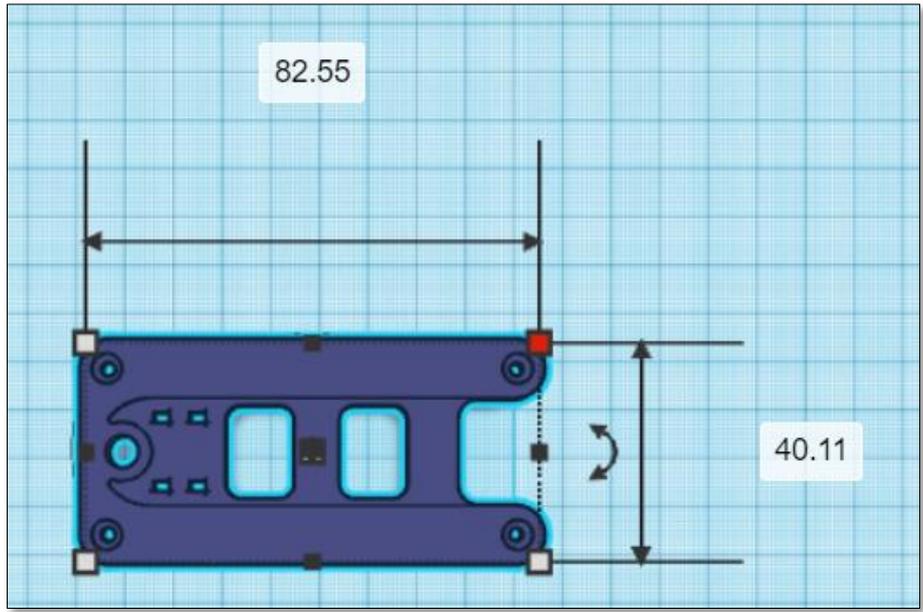
podle prováděcího nařízení Komise (EU) 2019/947 v platném znění (stav ke dni: 26. 8. 2022)



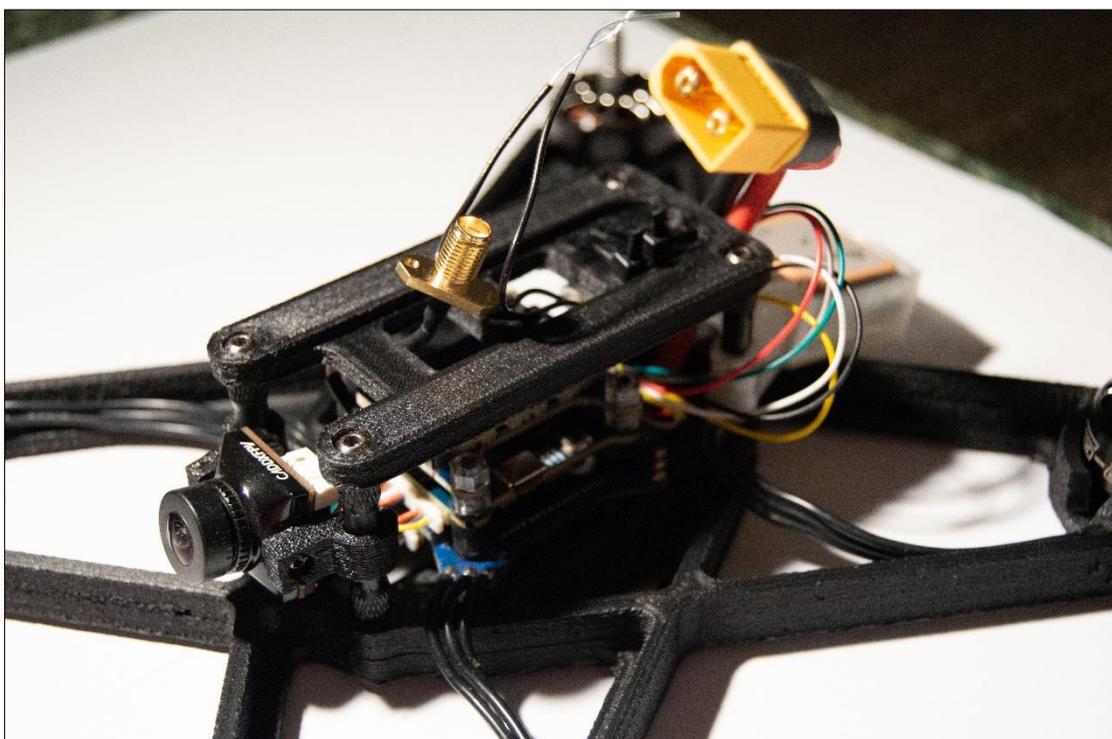
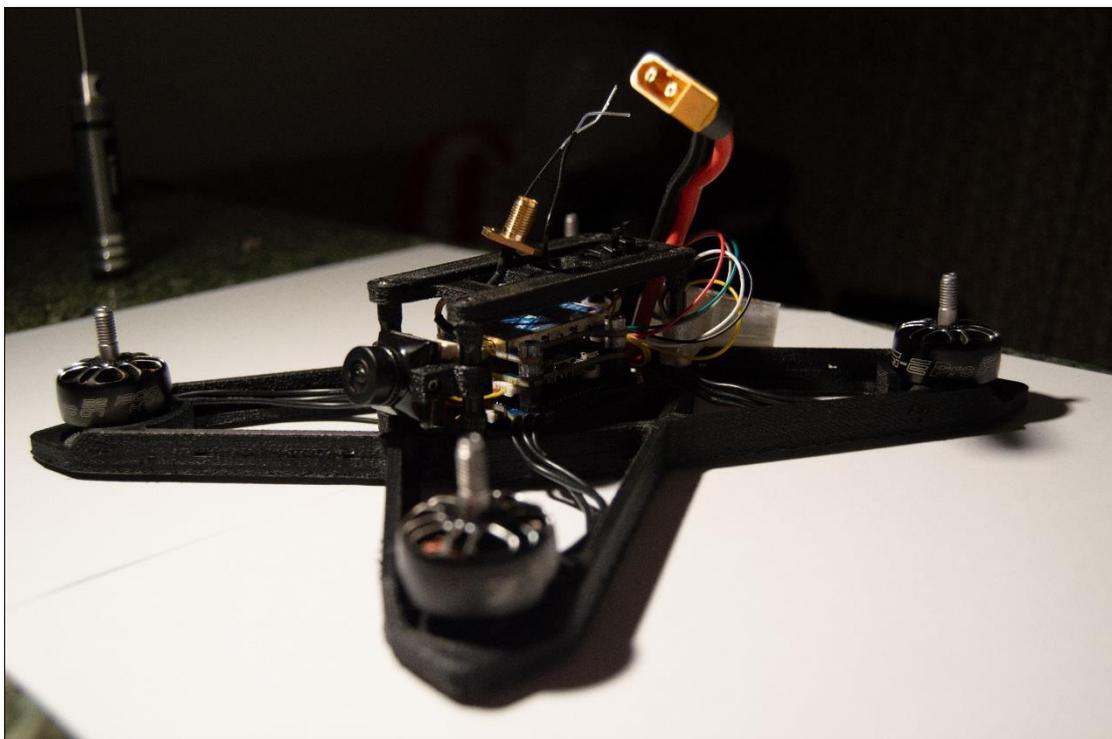
Výše uvedené schéma je pouze orientační a mělo by sloužit ke snadnější orientaci v kategorizaci provozu bezpilotních systémů podle společného evropského regulačního rámce pro bezpilotní systémy. Úřad pro civilní letectví nepřebírá žádnou odpovědnost za škody jakéhokoli druhu vyplývající z použití tohoto dokumentu.

Příloha 3 – Technická specifikace 3D vytištěných komponentů, zdroj: autor





Příloha 4 – Finální fotografie dokončené konstrukce, zdroj: autor







Zadání diplomové práce

Autor:	Bc. Petr Izák
Studium:	I2100061
Studijní program:	N1802 Aplikovaná informatika
Studijní obor:	Aplikovaná informatika
Název diplomové práce:	Analýza návrhu a konstrukce FPV GPS kvadrokoptéry s autonomním řízením
Název diplomové práce AJ:	Analysis of Design and Construction of FPV GPS Quadcopter with Autonomous Control

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Cílem práce je teoreticky zmapovat problematiku využití autonomních dronů v oblasti logistiky, mapování terénu, monitoringu, přepravy aj. a zaměřit se na silné a slabé stránky využití autonomních dronů. Praktická část práce bude zaměřena na zkonstruování 5" dronu při použití rámu ze součástí vytvořených 3D tiskem (osazeném ostatními komponentami). Ovládání bude zaměřeno na implementaci tzv. "plánovače misí" a autonomní řízení.

Osnova:

1. Úvod
2. Cíle práce
3. Teoretická část
4. Technický návrh řešení
5. Autonomní řízení
6. Testování a experimentální část
7. Shrnutí a srovnání existujících řešení
8. Závěr
9. Použitá literatura

Zadávací pracoviště: Katedra informačních technologií,
Fakulta informatiky a managementu

Vedoucí práce: doc. RNDr. Petr Tučník, Ph.D.

Datum zadání závěrečné práce: 15.10.2021