

UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Jakub Baďura

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh univerzálního řešení integrace elektroniky malého bezpilotního
prostředku

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub Baďura**
Osobní číslo: **D21369**
Studijní program: **B0716P040001 Technika, technologie a řízení letecké dopravy**
Téma práce: **Návrh univerzálního řešení integrace elektroniky malého bezpilotního prostředku**
Zadávající katedra: **Katedra letecké dopravy**

Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce je návrh univerzálního řešení integrace elektronických modulů pro potřeby zástavby do malého bezpilotního letounu s využitím komerčně dostupných jednotek na bázi PX4. Bakalářská práce bude obsahovat:

- analýzu možných konfigurací bezpilotního prostředku na bázi platformy PX4,
- řešení komunikace mezi bezpilotním prostředkem a operátorem,
- implementace mikroprocesoru na palubě letounu pro další zpracování dat a účel vyšší vrstvy řízení
- vytvoření funkčního návrhu bezpilotního letounu a ověření letovými zkouškami.

Rozsah pracovní zprávy: **35-45**
Rozsah grafických prací: **3-5**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

dle pokynů vedoucího práce

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jan Leuchter, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **24. února 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2025**

L.S.

doc. Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.
děkan

Ing. Michaela Ledvinová, Ph.D.
pověřená vedením katedry

V Pardubicích dne 25. února 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem *Návrh univerzálního řešení integrace elektroniky malého bezpilotního prostředku* jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 12. 5. 2025

Jakub Baďura v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Janu Leuchterovi, Ph.D. za pomoc, ochotu a užitečné rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat všem vyučujícím, kteří mě doprovázeli během mého bakalářského studia.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem univerzálního řešení integrace elektroniky malého bezpilotního prostředku s využitím otevřené platformy PX4. Cílem práce je vytvořit modulární a opakovatelný návrh elektronického systému vhodného pro různé typy malých bezpilotních letounů, který zahrnuje jak řídicí jednotku, tak i podpůrné senzory a komunikační prostředky. Výsledkem práce je funkční návrh, který může sloužit jako základ pro další vývoj nebo aplikaci v různých projektech využívajících bezpilotní prostředky s otevřenou architekturou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezpilotní prostředek, PX4, telemetrie, MAVLink, přídavná výpočetní jednotka

TITLE

Design of a Universal Solution for the Electronics Integration of a Small Unmanned Aerial Vehicle

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with the design of a universal solution for the integration of electronics of a small, unmanned vehicle using the open platform PX4. The aim of the thesis is to create a modular and repeatable design of an electronic system suitable for different types of small UAVs, which includes a control unit as well as supporting sensors and communication means. The result of the work is a functional design that can serve as a basis for further development or application in various projects using open architecture unmanned vehicles.

KEYWORDS

Unmanned aircraft, PX4, telemetry, MAVLink, onboard computer

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK	9
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	11
ÚVOD.....	13
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	14
1.1 Analýza možných konfigurací bezpilotního prostředku na bázi platformy PX4.....	14
1.1.1 Typy bezpilotních prostředků	14
1.1.2 Architektura systému PX4 a srovnání s konkurencí.....	14
1.1.3 Senzorická výbava a periferní zařízení.....	15
1.1.4 Srovnání FC jednotek podporujících standart pixhawk	17
1.2 Řešení komunikace mezi bezpilotním prostředkem a operátorem	18
1.2.1 Telemetrická komunikace	18
1.2.2 Řídicí a zobrazovací software	20
1.2.3 Komunikační protokol MAVLink	21
1.3 Implementace mikroprocesoru na palubě letounu.....	22
1.3.1 Companion computer.....	22
1.3.2 Výběr vhodné jednotky	23
1.3.3 Raspberry Pi 5 jako companion computer	24
2.1 Návrh koncepce bezpilotního letounu a pohonného systému	26
2.2 Integrace řídicí elektroniky na palubě letounu	27
2.3 Realizace sestavy	29
2.4 Testování a ověření funkčnosti	33
ZÁVĚR	50
POUŽITÁ LITERATURA	52

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: airMAX Bullet AC bez úprav [6]	20
Obrázek 2: UAV	26
Obrázek 3: Zjednodušené schéma napájení elektroniky.....	28
Obrázek 4: Ukázka zapojení řídicí elektroniky	30
Obrázek 5: Odpájení N type konektoru v cínové lázni.....	31
Obrázek 6: Rádio Bullet AC po úpravách	32
Obrázek 7: UAV připraveno na odpalovacím zařízení.....	34
Obrázek 8: GPS projekce trasy letu č. 1 [15]	35
Obrázek 9: Odhad výšky letu č. 1 [15].....	35
Obrázek 10: Zvýšené hodnoty vibrací letu č. 1 [15].....	36
Obrázek 11: Akcelerace v jednotlivých osách autopilota letu č. 1 [15]	36
Obrázek 12: Data GPS letu č. 1 [15]	37
Obrázek 13: GPS projekce trasy letu č. 2 [16]	38
Obrázek 14: Odhad výšky letu č. 2 [16].....	38
Obrázek 15: Graf ovládání aktuátorů letu č. 2 [16]	39
Obrázek 16: Hodnoty vibrací letu č. 2 [16]	40
Obrázek 17: Akcelerace v jednotlivých osách autopilota letu č. 2 [16]	41
Obrázek 18: Data GPS letu č. 2 [16]	41
Obrázek 19: GPS projekce trasy letu č. 3 [17]	43
Obrázek 20: Odhad výšky letu č.3 [17]	43
Obrázek 21: Průběh rychlosti v čase letu č. 3 [17]	44
Obrázek 22: Hodnoty vibrací letu č. 3 [17]	44
Obrázek 23: Průběh úhlu zatačení v čase letu č. 3 [17].....	45

Obrázek 24: Průběh úhlu klopení v čase letu č. 3 [17].....	45
Obrázek 25: Průběh úhlu klonění v čase letu č. 3 [17].....	45
Obrázek 26: Graf ovládání aktuátorů letu č. 3 [17]	46
Obrázek 27: GPS projekce trasy letu č. 4 [18]	48
Obrázek 28: Odhad výšky letu č.4 [18]	48

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

BEC – Battery Eliminator Circuit

BLDC – Brushless Direct Current Motor

CAN – Controller Area Network

CC – Companion Computer

DOP – Dilution of Precision

EKF – Extended Kalman Filter

EMI – Electromagnetic Interference

ESC – Electronic Speed Controller

FC – Flight Controller

FPV – First Person View

GNSS – Global Navigation Satellite System

GPS – Global Positioning System

GS – Ground Station

GPU – Graphics Processing Unit

HDOP – Horizontal Dilution of Precision

I²C – Inter-Integrated Circuit Protocol

IMU – Inertial Measurement Unit

LIDAR – Light Detection and Ranging

MAVLink – Micro Air Vehicle Link

PCB – Printed Circuit Board

PID – Proportional, Integral, Derivative Controller

PoE – Power Over Ethernet

RC – Radio Control

ROS – Robot Operating System

RTOS – Real-Time Operating System

RX – Receiver

SBUS – Serial Bus

SLAM – Simultaneous Localization and Mapping

TCP – Transmission Control Protocol

TTL – Transistor-Transistor Logic

UART – Universal Asynchronous Receiver / Transmitter

UAV – Unmanned Aerial Vehicles

UDP – User Datagram Protocol

USB – Universal Serial Bus

VDOP – Vertical Dilution of Precision

VLOS – Visual Line of Sight

VNA – Vector Network Analyzer

VTOL – Vertical Take-Off and Landing

ÚVOD

Bezpilotní letecké prostředky se v posledních letech staly významným nástrojem v celé řadě odvětví, od zemědělství, fotogrammetrie, přes průmyslové inspekce, vojenské použití až po výzkumné a výukové účely. S rostoucím rozsahem aplikací se zvyšují i nároky na elektronické systémy, které tvoří funkční základ těchto prostředků. Integrace řídicí jednotky, senzorů, komunikačních modulů a podpůrného výpočetního zařízení se tak stává klíčovým krokem při návrhu každého moderního UAV systému. Zvláště důležitá je přitom možnost modulárního a opakovatelně použitelného řešení, které je přizpůsobitelné různým potřebám a konstrukcím bez nutnosti návrhu od nuly.

Jedním z nejsilnějších nástrojů, které dnes vývojáři mají k dispozici, je open-source platforma PX4. Ta v kombinaci se standardem Pixhawk a komunikačním protokolem MAVLink umožňuje vytvářet autonomní systémy s širokou podporou komunity a možností rozsáhlé konfigurace. Současně s tím se v prostředí vývoje bezpilotních prostředků stále více uplatňují výkonné výpočetní moduly, které umožňují zpracovávat pokročilé algoritmy, vizuální data nebo zajišťovat pokročilou komunikaci. Společně tak tyto komponenty tvoří základ pro inteligentní a samostatně operující systémy.

Cílem této bakalářské práce je návrh, realizace a experimentální ověření univerzálního řešení integrace elektroniky malého bezpilotního letounu založeného na platformě PX4. Výsledný systém zahrnuje kompletní elektronickou architekturu, od autopilota, senzorické výbavy přes výpočetní modul až po datové propojení s pozemní stanicí prostřednictvím vysokorychlostního rádia. Návrh je orientován na modularitu, aby bylo možné snadno vyměňovat nebo doplňovat jednotlivé komponenty bez zásadních zásahů do struktury systému. Praktická část práce se zaměřuje na konkrétní fyzickou realizaci sestavy uvnitř UAV, optimalizaci rozmístění elektroniky vzhledem k těžišti a elektromagnetickému rušení, a zejména na letové testy, jejichž prostřednictvím je funkčnost celého řešení důkladně ověřena.

Neméně důležitým aspektem této práce je i předání praktické uživatelské zkušenosti. Detailní dokumentace návrhového postupu, volby komponent, řešení technických obtíží i interpretace výsledků letových zkoušek má sloužit jako srozumitelný průvodce pro další, kteří chtějí v oblasti UAV systémů experimentovat, vyvíjet vlastní platformy nebo se zapojit do open-source komunity kolem PX4.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Analýza možných konfigurací bezpilotního prostředku na bázi platformy PX4

1.1.1 Typy bezpilotních prostředků

Bezpilotní prostředky lze podle konstrukčního uspořádání rozdělit do několika hlavních kategorií:

Multikoptéry – Například kvadrokoptéry, hexakoptéry nebo oktokoptéry. Výhodou je jednoduchá konstrukce, schopnost visení na místě a dobrá manévrovatelnost, což je výhodné pro mapování, inspekce nebo lety v omezených prostorech. Nevýhodou je kratší doba letu kvůli nízké aerodynamické efektivitě.

Letouny s pevnými křídly – Vhodné pro dlouhé trasy, vyšší rychlosti a delší výdrž. Jsou ale náročnější na prostor pro start/přistání a nemají schopnost viset.

VTOL – Kombinují vlastnosti předchozích dvou typů. Jsou technicky složitější, ale mají potenciál kombinovat výhody obou předchozích typů.

Další – mimo jiné jde platforma PX4 používat i k autonomnímu ovládní a získávání telemetrie z pozemních vozítek, ponorek, lodí, horkovzdušných balonů či vzducholodí.

Platforma PX4 podporuje všechny výše uvedené typy prostřednictvím svých vestavěných letových módů a konfigurací parametrů. [1]

1.1.2 Architektura systému PX4 a srovnání s konkurencí

PX4 je open-source řešení pro řízení bezpilotních prostředků, postavený nad operačním systémem NuttX. Architektura PX4 je modulární, jednotlivé bloky (např. řízení výšky, GPS, senzory, logování) běží jako nezávislé úlohy a komunikují mezi sebou přes uORB messaging.

Základ tvoří řídicí jednotka (např. Pixhawk), na kterou jsou připojeny senzory, motory a další moduly. PX4 poskytuje stabilizační smyčky, výpočet trajektorie, komunikaci s operátorem, i správu mise. [1]

PX4 umožňuje jako jeden z mála open-source autopilotů plnohodnotnou integraci CC. Ten je připojen typicky přes sériové rozhraní UART nebo USB a využívá standardizovaný komunikační protokol MAVLink pro výměnu dat s autopilotem.

PX4 má na trhu několik hlavních konkurentů. Prvním z nich je **ArduPilot**, který patří mezi nejstarší a nejrozšířenější open-source FC systém. ArduPilot podporuje širokou škálu bezpilotních platform včetně letadel, multikoptér, lodí, pozemních vozidel i ponorek. Je známý svou robustností, bohatými možnostmi nastavení a rozsáhlou uživatelskou komunitou. Na rozdíl od PX4 však nepoužívá RTOS jako základ a jeho architektura je méně modulární. [20]

Dalším řešením je **INAV**, který je zaměřen především na hobby segment a menší bezpilotní prostředky. INAV je optimalizován pro levnější řídicí jednotky na bázi STM32 a jeho hlavním zaměřením je manuální nebo poloautonomní řízení pomocí RC souprav. Na rozdíl od PX4 nebo ArduPilotu nenabízí pokročilé možnosti plánování misí ani rozsáhlou integraci senzorů a výpočetních modulů. Je však oblíbený mezi uživateli FPV modelů díky své jednoduchosti a nízkým nárokům na hardware. [21]

PX4 představuje flexibilní a moderní systém vhodný zejména pro komerční použití, výzkumné účely, testování pokročilých funkcí a plně autonomní aplikace, kde je požadována vysoká míra přizpůsobení a integrace s výpočetními prostředky vyšší úrovně.

1.1.3 Senzorická výbava a periferní zařízení

Pro správné fungování bezpilotního prostředku je klíčová kvalitní senzorická výbava, která poskytuje autopilotu a nadřazeným systémům informace o poloze, rychlosti, orientaci, výšce a prostředí. V navrženém systému jsou použity především senzory standardně podporované autopilotem PX4, přičemž důraz byl kladen na kompatibilitu, přesnost a robustnost. V této kapitole jsou popsány jednotlivé senzory a periferní zařízení, jejich role v systému a důvody jejich výběru.

Základním navigačním senzorem je GNSS modul Holybro M9N, který podporuje více konstelací, což zajišťuje rychlejší fix a vyšší přesnost polohových dat. Modul komunikuje s autopilotem přes sériové rozhraní a je vybaven integrovaným kompasem, který umožňuje korekci orientace v absolutních souřadnicích. Díky podpoře až 25 Hz aktualizace a uBlox protokolu UBX je M9N vhodný i pro dynamické scénáře s rychle se měnící trajektorií. [22]

Pro měření rychlosti vůči okolnímu proudění vzduchu je využit Holybro Digital Airspeed Sensor, který pracuje na principu diferenčního tlaku (Pitotova trubice). Tento údaj je důležitý nejen pro stabilizaci, ale i pro výpočet trajektorie v režimech s aktivní regulací letu (např. při

silném protivětru). Senzor komunikuje přes I²C sběrnici a jeho kalibrace probíhá automaticky při startu systému. [23]

Barometrický výškoměr, který je integrován přímo v řídicí jednotce Cube Orange, zajišťuje informaci o relativní výšce letounu nad místem vzletu. V kombinaci s GPS a daty z IMU se využívá pro přesné držení výšky a stabilizaci vertikální osy. Pro zvýšení přesnosti výpočtů jsou data z barometru sloučena v rámci ekvivalentního filtru EKF2. [24]

EKF je rozšířený Kalmanův filtr, který slouží k fúzi dat z více senzorů a odhadu stavu systému, i když jsou vstupy nelineární. V autopilotech PX4 a ArduPilot je EKF využíván například k propojení údajů z gyroskopu, akcelerometru, magnetometru, barometru a GNSS přijímače. Výsledkem je přesnější a stabilnější odhad polohy, rychlosti, orientace a výšky letounu. EKF umožňuje filtraci šumu a korekci krátkodobých výpadků některých senzorů. [29]

Jednotka IMU integrovaná v autopilotu, obsahuje gyroskopy a akcelerometry, které měří úhlovou rychlost a zrychlení ve všech třech osách. Cube Orange obsahuje tři redundantní IMU čipy, z nichž systém v reálném čase vyhodnocuje spolehlivost a případně přepíná mezi nimi, pokud detekuje anomálii. Tato vícenásobná konfigurace je důležitá zejména z pohledu bezpečnosti a provozu v prostředí s vibracemi nebo rušením. [24]

Dále je použit přijímač dálkového ovládání TBS Crossfire Nano RX, který využívá robustní protokol s frekvencí 868 MHz, což zajišťuje dlouhý dosah a nízkou latenci. Tento přijímač je připojen přímo do SBUS vstupu autopilota a slouží k přenosu řídicích povelů v manuálním a poloautonomním režimu. [2]

Pro přenos obrazu a sběr vizuálních dat slouží IP kamera Hikvision DS-2CD2D45G1/M-D/NF (2.8 mm). Kamera využívá připojení přes Ethernet a poskytuje datový stream, který může být dále zpracováván na CC nebo přenášen na pozemní stanici pro přímé sledování. [25]

Celá senzorická sestava byla navržena s ohledem na spolehlivost, odolnost vůči rušení a schopnost integrace do PX4 systému. Díky použití standardních rozhraní (UART, I²C, Ethernet) je možné senzory snadno měnit nebo doplňovat. Zvolená kombinace senzorů poskytuje dostatečné množství dat pro stabilizaci, navigaci i autonomní řízení, přičemž zůstává prostor pro budoucí rozšíření systému.

1.1.4 Srovnání FC jednotek podporujících standart pixhawk

Pixhawk je otevřený hardwarový standard pro FC, který definuje nejen fyzické rozměry a konektory, ale také softwarové rozhraní kompatibilní s PX4 a ArduPilot. Díky otevřenosti tohoto standardu existuje na trhu řada řídicích jednotek různých výrobců, které Pixhawk standard podporují a rozvíjejí jej dále dle svých potřeb. Níže je uvedeno stručné srovnání několika běžně používaných jednotek.

Pixhawk 1 je první generace open-source autopilotu vyvinutá komunitou kolem projektu PX4. Využívá procesor STM32F4 (Cortex-M4) a disponuje základní sadou senzorů – jedním IMU a barometrickým senzorem. Přestože se dnes jedná o zastaralejší řešení, stále nachází uplatnění v amatérských nebo vzdělávacích aplikacích. Omezený výpočetní výkon a nižší sensorová redundance ale znamenají, že není ideální pro komplexnější nebo bezpečnostně kritické mise.

Pixhawk 4, vyráběný firmou Holybro ve spolupráci s PX4 vývojovým týmem, představuje modernizovanou a výkonnější variantu oproti Pixhawk 1. Je osazen procesorem STM32F765 (Cortex-M7), podporuje dva nezávislé IMU moduly a je vybaven moderními konektory pro snazší integraci. Má rovněž slot na microSD kartu pro logování. Jedná se o oblíbenou volbu pro vývojové a univerzitní projekty díky dobrému poměru výkon/cena.

Pixhawk 6X je nejnovější generace z řady komunitně vyvíjených autopilotů Holybro. Nabízí vysoký výpočetní výkon díky STM32H743 (Cortex-M7), tři nezávislé IMU moduly s možností redundantního měření, dvě barometrická čidla a vylepšené obvody pro filtrování napájení a snímání vibrací. Jednotka je navržena pro použití v pokročilých systémech, kde je vyžadována maximální spolehlivost, přesnost a modularita.

Cube Black byl první z modulární řady autopilotů vyvinutých firmou Hex/ProfiCNC. Nabízí vyšší mechanickou odolnost díky kovovému krytu a samostatnému nosiči s konektory. Využívá procesor STM32F427 a podporuje dva IMU senzory. I když byl svého času revoluční, v současnosti je již postupně nahrazován výkonnějšími verzemi (např. Cube Orange), ale stále je dostupný a používaný v jednodušších aplikacích.

Cube Orange je výkonnější následník předchozích generací Cube autopilotů. Využívá výkonný STM32H743 (Cortex-M7), obsahuje tři IMU moduly s teplotní kompenzací, dva barometry a podporuje redundantní letové režimy. Díky své odolnosti, modularitě a podpoře široké škály periférií je jedním z nejpoužívanějších autopilotů v profesionálním i výzkumném

sektoru. Je plně kompatibilní s PX4 i ArduPilot a je ideální pro komplexní a bezpečnostně náročné systémy. [24]

CUAV V5+ je autopilot komerčně vyráběný firmou CUAV a nabízí velmi robustní provedení. Využívá procesor STM32F765, podporuje dvoukanálové IMU a má integrovaný výkonový management. Je určen pro profesionální aplikace a těží z kvalitního zpracování a integrovaného EMI stínění. Bývá volen tam, kde je důležitá spolehlivost a kompaktnost při zachování kompatibility se standardem Pixhawk. [1]

Díky široké nabídce autopilotů kompatibilních se standardem Pixhawk bylo při výběru vhodné řídicí jednotky pro toto UAV nutno zohlednit více faktorů. Od výpočetního výkonu, přes redundanci senzorů, možnosti rozšíření, až po fyzickou robustnost a osvědčenost v profesionálních aplikacích. Pixhawk 1 byl kvůli zastaralému procesoru a absenci senzorové redundance brzy vyřazen ze zvažování, neboť by neumožnil spolehlivé řízení ve složitějších scénářích. Pixhawk 4 a CUAV V5+ představují cenově efektivní a dostatečně výkonná řešení, nicméně v porovnání s novějšími generacemi postrádají některé pokročilé vlastnosti, jako například tříkanálové IMU nebo pokročilé napájecí filtrace. Pixhawk 6X je sice výkonný a moderní, ale je méně efektivní volbou z hlediska ceny a dostupnosti. Rozhodnutí tedy padlo na jednotky z modulární řady Cube. Cube Black má sice osvědčený design a je stále široce používaný, ale s ohledem na vývojový pokrok, lepší senzorovou výbavu a vyšší výpočetní výkon procesoru STM32H743 se jako logická volba jeví novější jednotka Cube Orange. Důležitou roli v rozhodování hrála také její plná podpora pro PX4, rozšířená komunita uživatelů a snadná integrace s ostatními komponenty letadla. Díky své modularitě, robustnímu mechanickému provedení a schopnosti redundantního řízení s využitím trojitých IMU a dvou barometrických senzorů představuje Cube Orange ideální kompromis mezi výkonem, spolehlivostí a rozšiřitelností pro projekt bezpilotního prostředku, jehož návrh má splňovat vyšší nároky na bezpečnost, přesnost i dlouhodobou provozní stabilitu. [24]

1.2 Řešení komunikace mezi bezpilotním prostředkem a operátorem

1.2.1 Telemetrická komunikace

Bezpečná a spolehlivá komunikace mezi bezpilotním prostředkem a pozemní stanicí je klíčovým prvkem pro jeho provoz. Tento přenos zahrnuje několik základních datových kanálů, které mohou být různě kombinovány podle dostupných řešení pro přenos:

Telemetrie – zpětná vazba z letu, kontrola základních parametrů nutných pro let (např. GPS pozice, napětí baterie, rychlost, výška). Nízká náročnost na bitrate, avšak nutnost nízké latence. K těmto účelům se používají primárně sériová rádia.

RC link– ve většině případů jako záložní spojení pro případ komplikací. Umožňuje okamžité převzetí řízení při problémech do plně manuálního řízení, ale umožňuje i přepínání režimů, funkcí UAV a ovládání letadla v autonomních režimech. Nutný vysoký dosah, spolehlivost, latence. Nenáročný na bitrate. Například ELRS, TBS Crossfire

Video přenos – v reálném čase, často je řešen samostatným systémem. Vzhledem k velké náročnosti na bitrate nelze použít běžné sériové rádio. Například DJI OcuSync, Walksnail Avatar HD, analogové FPV.

Datové spojení pro pokročilé funkce – např. přenos sensorických dat, plánování mise, ladění systému.

Datové spojení s CC – řešení oboustranné komunikace a vzdáleného ovládání.

Ačkoliv je mnoho dostupných možností řešení komunikace s takovýmto prostředkem, jako nejuniverzálnější řešení se mi zamlouvá použití počítačové sítě pro spojení všech prvků bezpilotního prostředku a záložní RC link. Taková komunikace je sice složitější pro přenos na zem ale obsahuje již v základu zabezpečení a splňuje požadavky pro všechny druhy komunikace.

K této komunikaci použiji speciálně upravená rádia Ubiquiti airMAX Bullet AC. Tyto rádia nabízí provoz ve frekvenčním pásmu 2400–2483.5 MHz a 5150–5875MHz, vysoký bitrate, nízkou latenci. Poskytují plné nastavení ve webovém ovládacím rozhraní. Na použití v letadle bohužel disponují nevhodným konektorem typu N, vysokou hmotností, nevhodným obalem a nutností napájení skrze PoE. Úprava na těchto rádiích hardwarově spočívá ve vyndání z obalu, přepájení N type konektoru za RP-SMA konektor a přidání modulu pro PoE. Pro použití v letadle se dále konfiguruje parametry rádia za účelem dosažení co nejvyššího dosahu. [6]



Obrázek 1: airMAX Bullet AC bez úprav [6]

1.2.2 Řídicí a zobrazovací software

Nejčastěji používaným nástrojem pro operátora bezpilotních prostředků využívajících systém PX4 je **QGroundControl** – multiplatformní aplikace, která slouží k plánování misí, monitorování telemetrických dat a konfiguraci celého systému. Operátor má prostřednictvím QGroundControl k dispozici přehledné zobrazení letových údajů v reálném čase, může upravovat a nastavovat parametry autopilota PX4, plánovat a editovat automatické mise pomocí definovaných bodů trasy (waypoints), přenášet firmware do řídicí jednotky a rovněž sledovat obrazový výstup z připojených kamer. Díky této všestrannosti a uživatelské přívětivosti se QGroundControl stal de facto standardem pro práci s moderními FC. Aplikace QGroundControl podporuje všechny základní druhy OS a s FC komunikuje skrze MAVLink.

Kromě QGroundControl existují i další nástroje pro práci s bezpilotními prostředky, které mohou být vhodné v závislosti na použitém řídicím systému a požadavcích operátora. [3]

Mission Planner je rozsáhlý nástroj určený primárně pro autopiloty využívající firmware ArduPilot. Nabízí podobné funkce jako QGroundControl, jako je plánování misí, konfigurace systému, ladění parametrů a zobrazení telemetrických dat, avšak s důrazem na hlubší přístup k pokročilým funkcím a ladění. Je dostupný pouze pro Windows a je oblíbený mezi profesionály a vývojáři díky své otevřenosti a rozsáhlé komunitní podpoře. [20]

MAVProxy je textově orientovaný příkazový řádek a zároveň framework pro skriptování a správu bezpilotních systémů využívajících MAVLink. Je ideální pro automatizaci, testování a vývojové účely.

INAV Configurator je nástroj určený pro konfiguraci a správu systémů běžících na INAV firmwaru, který je populární zejména v oblasti menších dronů a modelářských letadel. Nabízí grafické rozhraní pro nastavení senzorů, kalibraci, definici letových režimů, plánování misí a další funkce s důrazem na jednoduchost a rychlost použití.

Každý z těchto nástrojů má své specifické výhody a oblast použití, přičemž výběr závisí především na použité platformě (PX4, ArduPilot, INAV), úrovni zkušeností uživatele a konkrétním nasazení daného bezpilotního prostředku. [21]

1.2.3 Komunikační protokol MAVLink

MAVLink je komunikační protokol, který se stal de facto standardem pro přenos dat mezi bezpilotními prostředky a pozemními řídicími stanicemi, ale také mezi jednotlivými subsystemy na palubě letounu. Jeho vývoj započal v roce 2009 na Technické univerzitě v Curychu pod vedením Lorentze Meiera, který jej původně navrhl pro projekt autopilotu Pixhawk a jako součást výzkumného prostředí pro malé UAV. Od počátku byl kladen důraz na nízkou přenosovou režii, binární efektivitu a snadnou implementaci v embedded systémech. Díky těmto vlastnostem si MAVLink rychle získal popularitu v komunitě okolo projektů PX4 a ArduPilot a stal se součástí širšího open-source ekosystému.

Protokol funguje na principu předem definovaných zpráv, které jsou strukturovány do kompaktní binární formy, aby minimalizovaly zátěž datového kanálu. Každá zpráva obsahuje identifikátor, délku, datová pole a kontrolní součet, čímž je zajištěna jak jednoznačnost, tak

integrita přenosu. V současnosti existují dvě hlavní verze protokolu – MAVLink 1.0 a MAVLink 2.0, přičemž druhá generace přináší podporu pro rozšířené funkce, jako je šifrování, autentizace zpráv nebo podpora dynamicky definovaných zpráv.

MAVLink se typicky přenáší prostřednictvím sériového rozhraní (UART), ale jeho struktura je agnostická vůči fyzické vrstvě, což umožňuje použití i přes Wi-Fi, LTE modemy, Bluetooth nebo přes UDP/TCP spojení v síťových aplikacích. V UAV systémech běží často jako samostatný softwarový modul – například v PX4 je možné jej nakonfigurovat pro různé vstupy a výstupy.

Díky podpoře širokého spektra FC platforem (PX4, ArduPilot) a softwarových nástrojů jako jsou QGroundControl, Mission Planner, MAVProxy nebo framework ROS, se MAVLink stal klíčovým prostředkem pro vývoj, testování a provoz moderních autonomních systémů. Jeho otevřenost, flexibilita a rozsáhlá dokumentace umožňují snadnou integraci i do komplexních systémů zahrnujících více zařízení, senzorů a řídicích modulů. MAVLink tedy není jen komunikačním protokolem, ale základním stavebním kamenem otevřeného UAV ekosystému. [3, 26, 27]

1.3 Implementace mikroprocesoru na palubě letounu

1.3.1 Companion computer

S rostoucími nároky na autonomii, zpracování sensorických dat v reálném čase a implementaci pokročilých algoritmů (např. počítačového vidění či strojového učení) přestává samotný autopilot dostačovat. Řešením je zařazení tzv. companion computer do architektury UAV. Jedná se o výpočetně výkonnější zařízení, které rozšiřuje schopnosti bezpilotního systému o vyšší vrstvy řízení, pokročilé senzory, nebo datové služby.

Companion computer představuje výkonnou výpočetní jednotku, která doplňuje klasický autopilot v UAV a rozšiřuje jeho schopnosti zejména v oblasti pokročilého řízení, zpracování dat a autonomie. Vzhledem k omezenému výpočetnímu výkonu FC, není možné přímo na této jednotce provozovat složitější výpočetní úlohy. Companion computer tento nedostatek řeší zpravidla na něm běží plnohodnotný operační systém (nejčastěji Linux) a nabízí možnost využití rozšířených knihoven jako ROS, Python, OpenCV, TensorFlow a dalších.

Jedním z nejčastějších scénářů použití je zpracování obrazových dat v reálném čase, kdy companion computer přijímá data z kamer, provádí detekci objektů, trasování, klasifikaci nebo

třeba odhad hloubky prostředí. Využití najde i při mapování a navigaci, ve spojení s LIDARem a algoritmy SLAM umožňuje vytvářet prostorové mapy a autonomně navigovat i v neznámém prostředí. Významnou výhodou CC je také jeho schopnost komunikovat s vnějšími systémy. Může sloužit jako komunikační brána mezi UAV a pozemní stanicí (GS), servery nebo cloudovými službami skrze rozhraní Wi-Fi, LTE nebo 5G. Umožňuje tak například streamování videa, aktualizaci mise za letu nebo odesílání diagnostických dat.

SLAM je zkratka pro „Simultánní lokalizaci a mapování“ a označuje metodu, při níž se UAV snaží současně odhadovat svou vlastní polohu v neznámém prostředí a zároveň vytvářet mapu tohoto prostředí. SLAM je základem pro autonomní navigaci v prostředí, kde není dostupná GPS, např. v budovách, tunelech nebo lesních porostech. [33]

Další využití zahrnuje řízení doplňkového hardwaru (např. výklopné mechanismy, environmentální senzory, serva), nebo přemostování různých komunikačních sběrnic (UART, I²C, CAN) směrem k autopilotu PX4. Díky tomu lze do systému snadno integrovat specializované senzory nebo zařízení, které autopilot přímo nepodporuje. V oblasti autonomie umožňuje CC provozování rozhodovacích algoritmů, například kdy misi přerušit, vrátit se na základnu nebo se vyhnout překážkám na základě okolních podmínek.

Díky těmto schopnostem se companion computer stává klíčovým prvkem zejména v systémech, které cílí na vyšší míru autonomie, pokročilou environmentální interakci a schopnost přizpůsobit se dynamickým podmínkám v reálném čase. [7, 8, 19, 28]

1.3.2 Výběr vhodné jednotky

Companion computer (doprovodný výpočetní modul) slouží jako výkonný procesorový prvek doplňující autopilota a umožňuje provoz pokročilých algoritmů z oblasti zpracování obrazu, umělé inteligence, strojového učení, síťové komunikace či datové fúze ze senzorů. V této práci bylo cílem zvolit jednotku s dostatečným výpočetním výkonem pro zpracování dat z kamerových systémů, se schopností běžet pod plnohodnotným operačním systémem (Linux) a s rozhraními umožňujícími integraci do sítě i komunikaci s autopilotem.

Raspberry Pi 5 představuje výrazný posun oproti předchozím verzím této platformy. Nabízí čtyřjádrový procesor ARM Cortex-A76 s taktem až 2,4 GHz, GPU VideoCore VII, až 8 GB RAM, dva porty USB 3.0, PCIe rozhraní a gigabitový ethernet. Díky široké podpoře komunitou, rozšířenému ekosystému a nízké pořizovací ceně se jedná o mimořádně atraktivní

řešení pro většinu aplikací. Výhodou je také kompaktní rozměr a dobrá dostupnost vývojových knihoven, například pro práci s Mavlinkem, OpenCV nebo ROS. [7]

NVIDIA Jetson Nano je zaměřen na aplikace vyžadující akceleraci strojového učení díky integrovanému GPU NVIDIA Maxwell. Nabízí solidní výkon pro základní úlohy v oblasti AI, ale trpí omezenou pamětí (4 GB RAM) a nižším výpočetním výkonem CPU (Cortex-A57), což může být limitující při souběžném běhu více náročnějších služeb. Výhodou je silná podpora frameworků jako TensorRT, ale v porovnání s Pi 5 je méně univerzální mimo oblast AI. [8]

NVIDIA Jetson Orin Nano / Orin NX Novější modely Jetson Orin výrazně překonávají starší Nano ve všech směrech — nabízejí vícejádrové CPU ARM Cortex-A78AE, výkonné GPU Ampere a podporu pro složité AI úlohy v reálném čase. Jsou však cenově i energeticky náročnější a jejich integrace do malých systémů bývá složitější. Jsou vhodné spíše pro rozsáhlejší aplikace, kde je zpracování obrazu klíčovou funkcí. [8]

Intel NUC představuje výkonné miniPC postavené na architektuře x86. Nabízí vysoký výpočetní výkon, plnou kompatibilitu s desktopovým softwarem a možnost provozovat virtualizaci nebo kontejnery. Jeho nevýhodou jsou vyšší náklady, větší rozměry a vyšší spotřeba energie. V leteckých bezpilotních aplikacích bývá používán hlavně tam, kde je prioritou provoz složitých desktopových aplikací. [19]

1.3.3 Raspberry Pi 5 jako companion computer

Raspberry Pi 5 představuje výkonnou a zároveň kompaktní platformu, která je díky své otevřené architektuře, rozšířenosti v komunitě a široké softwarové podpoře vhodná pro nasazení v roli companion computeru v bezpilotních systémech. Vzhledem k tomu, že je založené na běžné ARM architektuře, umožňuje provoz celé řady operačních systémů, přičemž v oblasti autonomních systémů se nejčastěji uplatňují linuxové distribuce, jako je Raspberry Pi OS, Ubuntu Server nebo specializované varianty určené pro robotiku a zpracování dat.

Na těchto operačních systémech může běžet široké spektrum softwarových nástrojů, které rozšiřují schopnosti letounu nad rámec možností samotného autopilota. Typickým příkladem je Robot Operating System (ROS), který poskytuje strukturovaný rámec pro vývoj modulárních aplikací v robotice. Jeho prostřednictvím lze realizovat plánování trajektorie, správu senzorických vstupů, komunikaci mezi komponentami a další úlohy vyšší úrovně řízení. V kombinaci s nástrojem MAVROS lze dosáhnout přímého propojení mezi autopilotem

komunikujícím přes MAVLink protokol a výpočetním prostředím ROS, což umožňuje např. přepínání letových režimů, plánování misí nebo interpretaci stavových zpráv.

Kromě ROS je možné na Raspberry Pi provozovat i knihovny pro strojové vidění, jako je OpenCV, které umožňují v reálném čase detekovat objekty, sledovat pohyb nebo analyzovat obrazová data z palubní kamery. Díky podpoře jazyků jako Python lze navíc rychle vyvíjet vlastní skripty pro záznam a vyhodnocení telemetrických dat, adaptivní řízení nebo logiku autonomního chování. Dále je možné zajistit komunikaci s externími zařízeními a pozemními stanicemi pomocí standardních rozhraní jako Wi-Fi, LTE nebo 5G, což umožňuje přenos dat, vzdálenou správu nebo přístup ke cloudovým službám.

Tato softwarová flexibilita činí z Raspberry Pi 5 výhodnou volbu pro vývojové a výzkumné účely, kde se často experimentuje s různými algoritmy, senzory a řídicími strategiemi. Platforma tak umožňuje efektivně testovat nové přístupy k autonomii, a přitom zachovat modulární a snadno rozšiřitelnou strukturu celého UAV systému. [7]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Návrh koncepce bezpilotního letounu a pohonného systému

Pro zástavbu a testování použijí již navrhnutou a letovými testy ověřenou koncepci letounu se záporným šípem a motýlími plochami, která disponuje čtyřmi ovládacími plochami. O klonění se starají dvoje křídélka na koncích křídel, o klopení a zatáčení do směru se starají motýlí plochy v zadní části trupu.



Obrázek 2: UAV

Letoun je poháněn tlačnou vrtulí a BLDC motorem umístěným na zádi letadla. Pro pohon je užit šesti článkový lithium-polymerový akumulátor s kapacitou 9000mAh. Napájení serv používá BEC 7.2 V, který je součástí ESC T-MOTOR AM116A, připojením ESC do Cube Orange se napájí celý servorail, skrz který jsou dále napájena i serva. [24]

Vzhledem k tomu že se jedná o původní prototyp určený na letové testy, je letadlo vytvořeno metodou pozitivní laminace skelné tkaniny a rovingů na 3d tisk. Ačkoliv nese tato metoda nevýhodu ve větší váze, nedokonalém povrchu a menší celkové odolnosti draku, je tento postup ideální, jelikož se nemusí vytvářet formy a jsou možné provádět další úpravy na draku před finálním zaformováním.

Finální konstrukce letounu má být řešena jako laminátový sendvič tvořený skelnou tkaninou a pěnou Herex, což zajišťuje nízkou hmotnost při zachování dostatečné tuhosti a pevnosti při

provozních zatíženích. Skelný laminát se používá z důvodu nižší pořizovací ceny oproti uhlíkovým kompozitům a zároveň poskytuje lepší elektromagnetickou transparentnost. [34]

Maximální vzletová hmotnost letounu je stanovena na 6 kg, což zahrnuje hmotnost draku, pohonného systému, veškeré avioniky, napájecích článků a případného neseného nákladu. Co se týče letové obálky, pádová rychlost letounu je 16 m/s, cestovní rychlost při horizontálním letu se pohybuje okolo 25 m/s. Při návrhu palubní elektroniky a rozložení jednotlivých komponent je nutné zohlednit omezený prostor uvnitř trupu, těžiště letounu a minimalizaci elektromagnetického rušení.

Při návrhu této koncepce byl kladen důraz na modularitu a dostatek prostoru pro umístění řídicí elektroniky a doplňkových senzorických systémů. Trup letounu obsahuje přístupný prostor pro zástavbu autopilota, napájecích modulů a pomocného výpočetního zařízení. Díky umístění pohonu v zadní části vzniká volný výhled pro pilotní kameru a dochází k uvolnění místa pro akumulátor v přední části trupu. Celkové řešení poskytuje robustní a zároveň flexibilní platformu pro testování různých elektronických konfigurací a autonomních funkcí v rámci experimentální části práce.

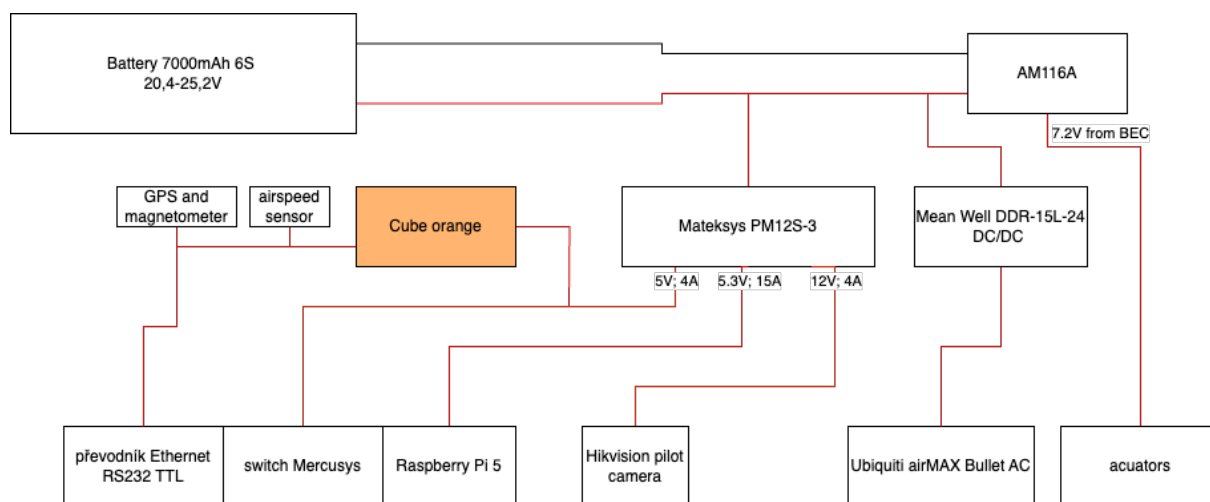
2.2 Integrace řídicí elektroniky na palubě letounu

Autopilot Cube Orange zajišťuje nízko úroňové řízení letounu a zpracování dat z palubních senzorů. Cube Orange je připojen k doplňkovému výpočetnímu zařízení Raspberry Pi 5 prostřednictvím převodníku FTDI TTL-232R-3V3, který zajišťuje sériovou komunikaci mezi oběma zařízeními. Raspberry Pi slouží jako CC, určený k vyššímu zpracování dat, případnému streamování obrazu a komunikací s pozemní stanicí. Jako záložní spojení s FC slouží převodník Ethernet RS232 TTL, ten je připojen přímo do telemetrického portu FC a obstarává posílání MAVLink zpráv v případě nefunkčnosti CC nebo pro vzdálenou konfiguraci skrz QGround Control. [24]

Přijímač dálkového ovládání TBS Crossfire Nano RX je připojen přímo do SBUS vstupu autopilota, čímž umožňuje přenos řídicích signálů do řídicí jednotky. Pro určování polohy je připojen modul Holybro M9N GPS, který poskytuje signál GNSS a data o nadmořské výšce. Měření rychlosti vzduchu zajišťuje Holybro Airspeed Sensor, připojený přes I2C sběrnici. [22, 23]

Jako pilotní kamera je použita Hikvision DS-2CD2D45G1/M-D/NF (2.8mm), připojená přes Ethernet do síťového switche, který zároveň slouží pro propojení s Raspberry Pi. Všechna ethernetová zařízení (kamera, RPi, Cube) jsou připojena ke komunikačnímu rádiu Ubiquiti airMAX Bullet AC, které zajišťuje vysokorychlostní přenos dat do pozemní stanice. Toto rádio je napájeno samostatně pomocí zdroje 24 V skrz PoE. [6, 25]

Napájení ostatních systémů je řešeno s pomocí napájecího modulu Holybro PM12S-3, který poskytuje stabilizované napětí pro autopilot, Raspberry Pi, kameru, switch, převodník RS232 a připojené senzory. Celá sestava byla navržena s cílem minimalizovat elektromagnetické rušení a optimalizovat rozmístění komponent vzhledem k těžišti letounu a jeho aerodynamickému profilu.



Obrázek 3: Zjednodušené schéma napájení elektroniky

Napájecí modul PM12S-3 poskytuje tři výstupní větve: 12 V (4 A), 5.3 V (15 A) a 5 V (4 A), přičemž jednotlivé komponenty palubní elektroniky jsou k těmto větvím připojeny dle jejich požadavků na napájení. Na výstup 12 V je napájena pouze pilotní kamera Hikvision DS-2CD2D45G1/M-D/NF (2.8mm), jejíž proudový odběr se pohybuje přibližně kolem 0.5 A, takže zůstává dostatečná rezerva pro případné další zařízení. Výstup 5.3 V je vyhrazen výhradně pro jednotku Raspberry Pi 5, která v plné zátěži odebírá přibližně 3.5 A, což je hluboko pod maximálním limitem větve. Výstup 5 V slouží pro napájení řídicí jednotky Cube Orange a ethernetového switche Mercusys MS105, jejichž společný odběr je odhadován na zhruba 1.8 A. I zde tedy zůstává dostatečná proudová rezerva. Celkově jsou všechny napájecí větve PM12S-3 dimenzovány s výraznou rezervou, což zajišťuje stabilní a spolehlivý provoz celé sestavy. [25]

2.3 Realizace sestavy

Po návrhu koncepce a výběru vhodných komponent byla provedena fyzická integrace všech systémů do draku letounu. Vzhledem k omezenému prostoru v trupu a požadavku na zachování správné polohy těžiště bylo rozmístění jednotlivých prvků pečlivě plánováno. Autopilot Cube Orange byl umístěn co nejbližší geometrickému středu letounu, aby se minimalizoval vliv vibrační a zlepšila kvalita dat ze senzorů IMU. Raspberry Pi 5 byl umístěn do volného prostoru vybaveného chlazením a přístupem k ethernetové síti.

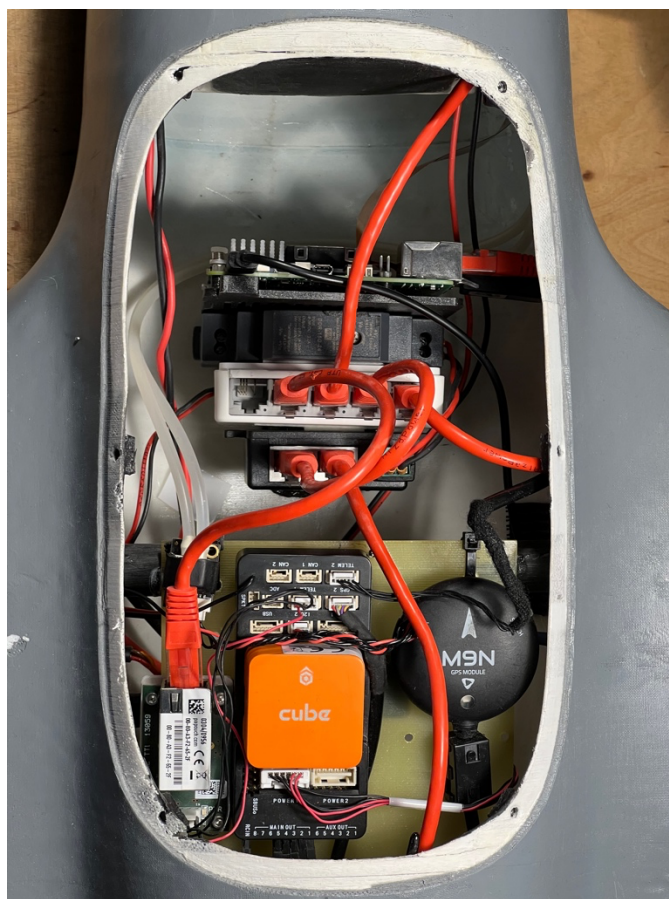
Ethernetová komunikace mezi zařízeními je vedena do switchu, který propojuje RPi, kameru, převodník od FC a následně je svedena do komunikačního rádía Ubiquiti Bullet AC. Toto rádio bylo upraveno pro uchycení do trupu letounu a je napájeno externím zdrojem 24 V přes PoE. Uchycení antén bylo navrženo tak, aby minimalizovalo stínění od ostatních částí draku.

Komunikační sběrnice (I2C, UART, SBUS) jsou vedeny tak, aby se co nejvíce omezilo elektromagnetické rušení. Pozice modulu GPS Holybro M9N má volný výhled k obloze a na přívodním kabelu je umístěn feritový filtr pro odstínění nežádoucího elektromagnetického rušení. [22]

Elektromagnetické rušení (EMI) představuje významný problém při návrhu elektroniky bezpilotních prostředků, které kombinují citlivé senzory s výkonnými elektrickými komponenty. V letadle může EMI vznikat z různých zdrojů – typicky z regulátorů otáček (ESC), elektromotoru, přepínaných napájecích zdrojů, komunikačních modulů, nebo z dlouhých kabelových svazků, které působí jako antény. Takové rušení může negativně ovlivnit činnost autopilota, GPS přijímače, telemetrie nebo palubních senzorů. Projevy EMI závad mohou být různorodé například výpadky GPS signálu, kolísání barometrické výšky, nestabilita letu nebo nespolehlivá komunikace. Důležitou součástí návrhu UAV je tedy minimalizace a odstranění takového EMI. Důležitá je kontrola logů letu s hledáním výpadků nebo šumu v datech, fyzická kontrola vedení kabelů a jejich odstínění, testování systémů jednotlivě a případně použití spektrálního analyzátoru. Preventivními opatřeními jsou zkracování kabelů, křížení napájecích a datových vedení v pravém úhlu, použití feritových filtrů, stínění kritických vodičů a oddělení silových částí od signálových. Správná diagnostika a minimalizace EMI je klíčová pro spolehlivý provoz bezpilotního systému. [13]

Celkově byla sestava navržena s důrazem na modularitu, spolehlivost a snadnou údržbu. Všechny komponenty náchylné na vibrace byly uchyceny na pěnovou oboustrannou lepicí pásku či na 3M Dual-Lock pásku. Uprostřed letadla se nachází DIN lišta pro uchycení a snadnou montáž CC, zdroje pro rádio, switche a PoE injektoru. Letoun tak představuje plně funkční, flexibilní platformu pro testování autonomních funkcí, ladění palubního systému na bázi PX4 a další testování a přidávání funkcí CC. Díky modularitě je možné do budoucna měnit jednotlivé komponenty, zejména rádio a CC.

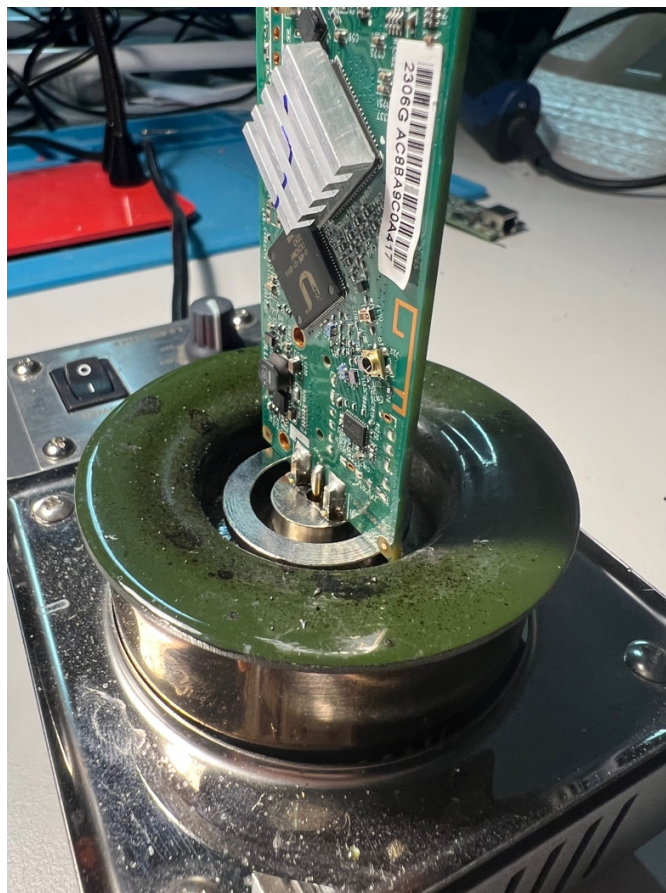
FC spolu se senzory, převodníkem a GPS přijímačem se nachází uchycené na sklotextitové desce v horní části trupu. Mechanicky odolnější komponenty jsou uchycené na DIN liště ve spodní části trupu.



Obrázek 4: Ukázka zapojení řídicí elektroniky

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.1, ke komunikaci se používají speciálně upravená rádia Ubiquiti airMAX Bullet AC. Ačkoliv jsem se při návrhu tohoto UAV snažil o používání a rozvržení komponent pro co nejmenší množství práce pro osazení letadla, tedy o potenciální zjednodušení výroby dalších kusů, u těchto komponent je bohužel nutný velký zásah do

hotového výrobku rádiové jednotky. Po odšroubování krycího plastu je nutné odpájení již osazeného N type konektoru a osazení konektorem typu RP-SMA. Tato procedura začíná při ohřátí původního konektoru v cínové lázni, zde se musí kontrolovat teplota PCB aby nedošlo k poškození nebo odpájení dalších komponent krom konektoru. Po odstranění se na pájecí stanici odstraní přebytečné zbytky pájky z PCB a po očištění je připravena na osazení nového konektoru. Po pájení probíhá vizuální kontrola a praktická zkouška za pomoci druhého rádia. Jako finální krok se vkládá rádiová jednotka do 3d vytištěného držáku a zajišťuje se s pomocí jednoho šroubu M2,5. Tento držák se dále uchycuje v trupu za pomoci pásky 3M Dual-Lock. [6]



Obrázek 5: Odpájení N type konektoru v cínové lázni



Obrázek 6: Rádio Bullet AC po úpravách

Volba kvalitních antén a jejich správné umístění v trupu letounu představuje zásadní aspekt pro zajištění spolehlivého a stabilního přenosu dat, zejména v případě telemetrického spojení mezi letadlem a pozemní řídicí stanicí. Nesprávné umístění nebo použití nevhodných antén může vést ke ztrátě signálu, snížení dosahu nebo nespolehlivé komunikaci v kritických fázích letu.

Na straně GS je využita směrová panelová (Patch) anténa Maple Wireless 2.4G 9dBi, která je navržena pro pásmo 2.4 GHz. Tato anténa poskytuje vysoký zisk a relativně úzký vyzařovací diagram, což z ní činí vhodnou volbu pro směrové spojení s letounem, kdy je požadován delší dosah a větší energetická efektivita v daném směru. Směrový charakter této antény zároveň vyžaduje její směřování na aktuální polohu letadla, což může být řešeno buď manuálně, nebo dodatečným automatickým natáčením. Vzhledem k cílenému použití v jednom směru není nutné toto téma zatím řešit. Na straně letadla je použita flexibilní PCB anténa Taoglass Freedom FXP832, která pokrývá široké frekvenční spektrum od 2.4 GHz až po 6 GHz (2.4/4.9–6.0 GHz). Vzhledem k tomu, že pozemní patch anténa je konstruována výhradně pro 2.4 GHz, je nezbytné zajistit, aby i rádiový modul v letadle pracoval právě v tomto pásmu. Provoz na vyšších frekvencích by sice mohl teoreticky nabídnout vyšší přenosové rychlosti, nicméně by vedl k výraznému snížení dosahu, vyššímu útlumu při průchodu materiály, a hlavně k neefektivnímu využití pozemní antény, která by při jiných frekvencích vykazovala špatné přizpůsobení a nízký zisk. Z hlediska rádiových vln je pásmo 2.4 GHz vhodným kompromisem mezi dosahem a propustností. Nabízí dostatečný dosah pro většinu běžných UAV misí, zároveň není tolik citlivé na překážky jako vyšší pásma (např. 5.8 GHz) a zároveň není tak náchylné na interference jako nižší pásma (např. 433 MHz), která jsou navíc často regulovaná přísnějšími pravidly.

Flexibilní anténa Taoglass umožňuje snadné umístění díky možnosti nalepení na trup. Důležité však je, aby v jejím okolí nebyly vodivé nebo silně stínící materiály, které by mohly negativně ovlivnit vyzařovací charakteristiku, přizpůsobení nebo přímo způsobit odrazy a ztráty. Pro zajištění maximální efektivity přenosu je klíčové dodržet požadované frekvenční pásmo a

vhodně umístit antény do prostředí s minimem rušení a překážek. Vhodné umístění antény na UAV je klíčové pro zajištění stabilního a spolehlivého rádiového spojení. Anténa by měla být co nejdále od zdrojů elektromagnetického rušení, jako jsou regulátory otáček, napájecí kabely či vysílací moduly jiných systémů, a zároveň co nejméně stíněna konstrukcí letounu. Ideální je takové umístění, kde má anténa dostatek volného prostoru a co nejširší výhled do okolí – v případě pevného křídla to často bývá například směrovka. Vzhledem k tomu, že směrovka bývá z kompozitních materiálů a nachází se mimo hlavní zdroje rušení, představuje vhodné místo i z hlediska elektromagnetické kompatibility. Pro optimalizaci tohoto umístění lze využít vektorový síťový analyzátor (VNA), kterým lze před a po instalaci antény změřit její přizpůsobení v požadovaném frekvenčním pásmu, např. kolem 2.4 GHz. Umístěním antény do různých částí trupu a opakovaným měřením na VNA lze sledovat, zda se mění rezonanční frekvence, zvyšuje odraz nebo klesá zisk, což by značilo negativní vliv blízkého okolí. Vhodné umístění je pak takové, kde jsou tyto vlivy minimální a anténa dosahuje optimálního přizpůsobení. [10, 11, 12, 14]

2.4 Testování a ověření funkčnosti

Nastavení FC na bázi PX4 se provádí skrz aplikaci QGround Control, zde se přepisují parametry, provádí veškeré kalibrace, nastavuje se zde fail safe a bezpečnostní funkce.

Před letovými testy byla na zemi vyzkoušena správná orientace smyslů výchylek nakláněním letadla v režimu stabilizace a ověřena i orientace a správnost dat z telemetrie.

Pro ověření správné funkce navrženého bezpilotního letounu byla provedena série testovacích letů, přičemž každý z nich byl detailně analyzován pomocí nástroje Flight Review. Tento nástroj umožňuje interaktivní analýzu letových logů a poskytuje přehled o různých aspektech letu, jako jsou letové režimy, chování senzorů, výstupy aktuátorů a další důležité parametry.

Průběh testovacích letů bezpilotního letounu zahrnuje několik důležitých fází. Start probíhá s pomocí odpalovacího zařízení, katapultu, který zajišťuje dostatečné zrychlení UAV nad jeho pádovou rychlost. Tento způsob startu je nezbytný zejména kvůli absenci klasického podvozku, který by jinak umožňoval konvenční rozjezd po zemi. Katapult umožňuje rychlé a bezpečné vypuštění i v omezených podmínkách, například na polních letištích nebo v těžším terénu.

Bezprostředně po opuštění katapultu je UAV ovládáno v manuálním režimu, ve kterém operátor spouští motor a zajišťuje základní stabilizaci letu. V této fázi je klíčová zkušenost operátora,

protože bezprostřední fáze letu po startu je dynamická a kritická z hlediska řízení. Po nabrání dostatečné výšky a rychlosti je možné plynule přecházet do poloautomatických nebo autonomních letových režimů.

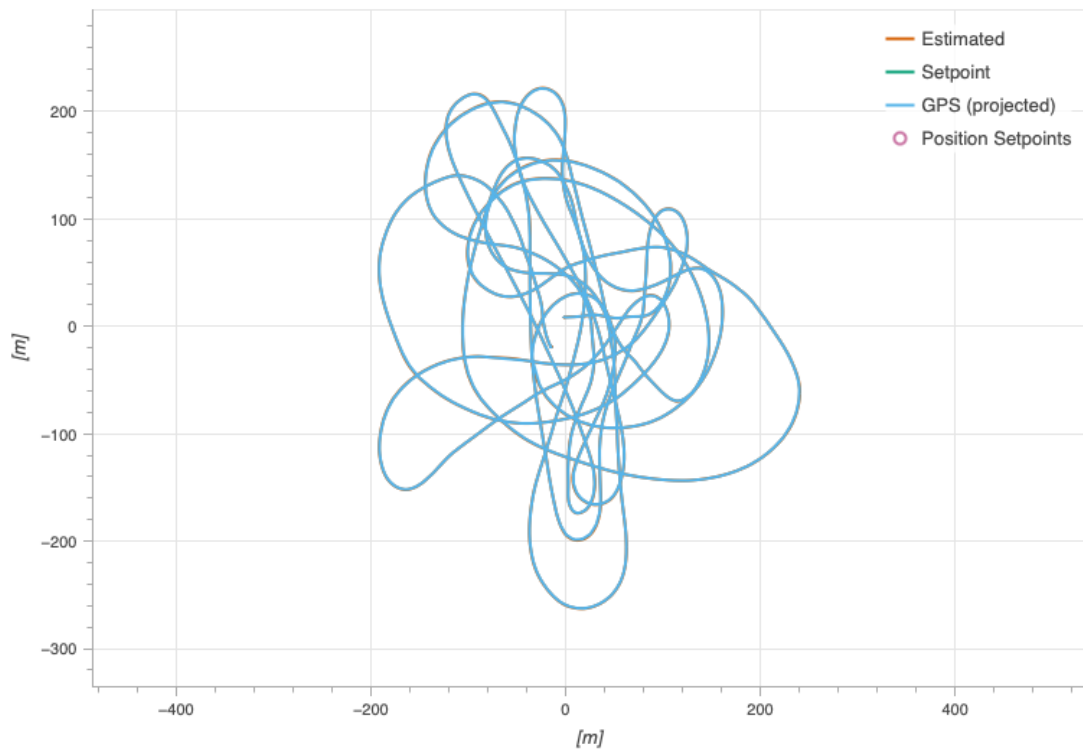
Přistání probíhá na břicho letounu, tedy bez použití podvozku, přímo na travnatý povrch. Letoun je proto konstrukčně navržen tak, aby snesl nárazy a vibrace způsobené tímto způsobem přistání, trup je zesílen a kritické části jsou chráněny proti poškození. Tato metoda přistání je jednoduchá na realizaci a dobře se hodí pro testovací provoz, zároveň ale vyžaduje pečlivý výběr místa přistání.



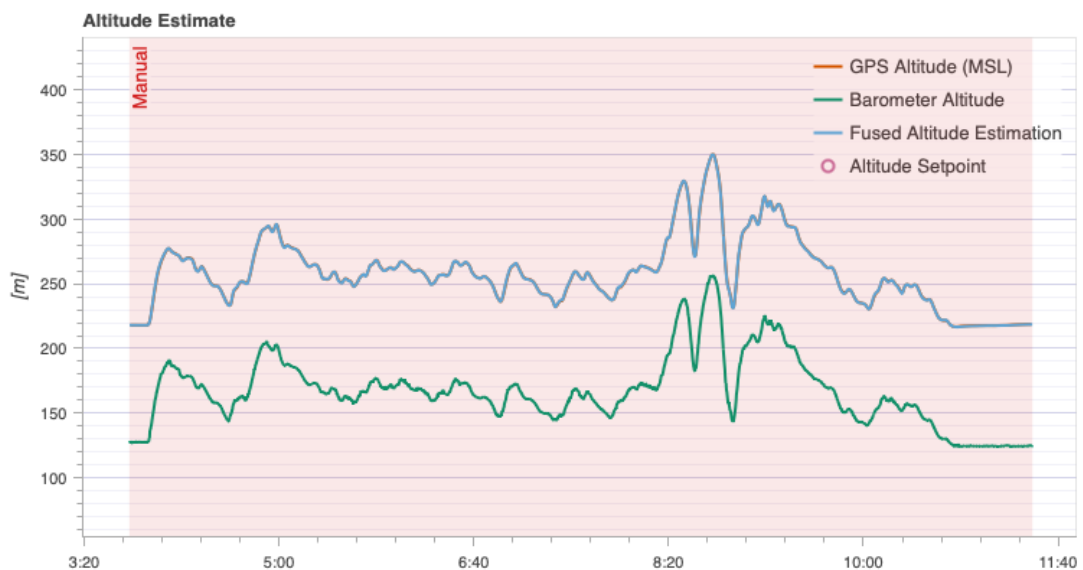
Obrázek 7: UAV připraveno na odpalovacím zařízení

První let – mechanické ověření a analýza vibrací

První let sloužil jako úvodní test, zaměřený na ověření základních mechanických vlastností letounu, jako je tuhost konstrukce, vyvážení těžiště a funkčnost pohonného systému. Let se uskutečnil za dobrých povětrnostních podmínek a s minimálním větrem. Řízení bylo po celou dobu v režimu Manual, což znamená, že autopilot pouze zaznamenával sensorická data, ale nijak nezasahoval do řízení, to zajišťoval výhradně operátor. Tento přístup je běžný v raných fázích testování, protože umožňuje mít přímou kontrolu nad letounem a okamžitě reagovat na případné potíže.



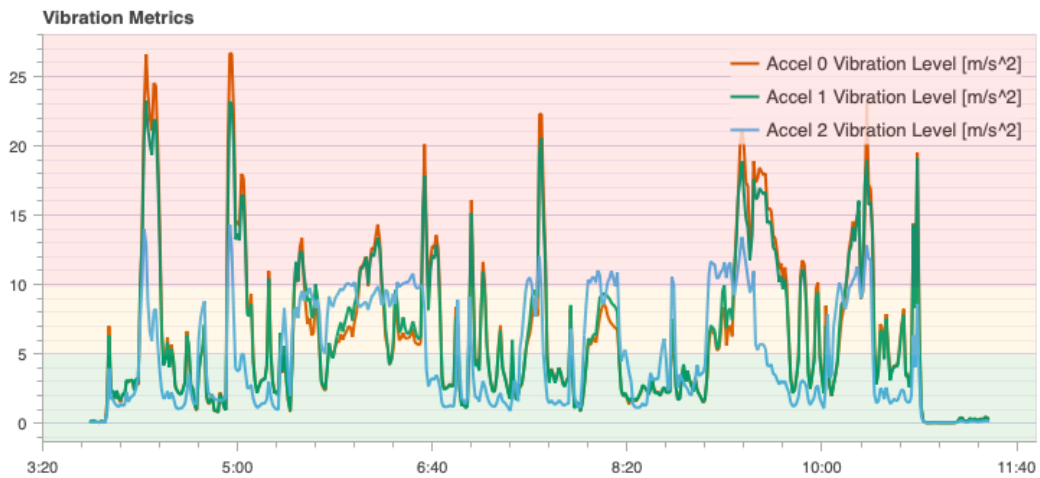
Obrázek 8: GPS projekce trasy letu č. 1 [15]



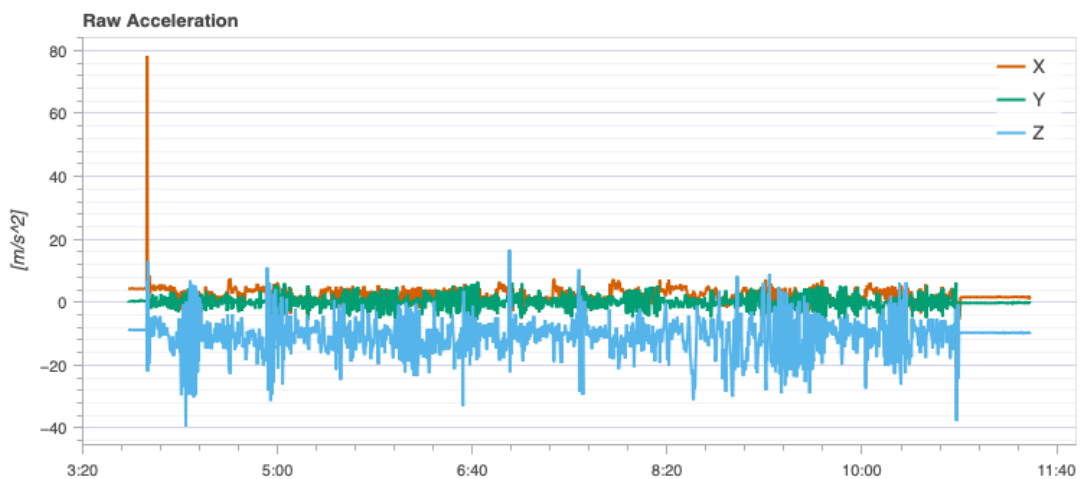
Obrázek 9: Odhad výšky letu č. 1 [15]

Během samotného letu nebyly pozorovány žádné mechanické problémy. Letoun se choval stabilně a operátorovi nezpůsobil potíže při řízení které by mohly vzniknout rozhozeným těžištěm či špatnou aerodynamickou stabilitou. Až následná analýza letového logu v nástroji PX4 Flight Review odhalila výrazně zvýšenou úroveň vibrací ve všech osách, zejména pak v ose Z. Tyto vibrace přesahovaly doporučené provozní limity a svědčily o přítomnosti mechanického rušení. Po kontrole komponent bylo zjištěno, že jejich hlavním zdrojem byla

nepřesně vyrobená a nevyvážená vrtule. Ta byla po prvním letu nahrazena novým kusem od stejného výrobce.

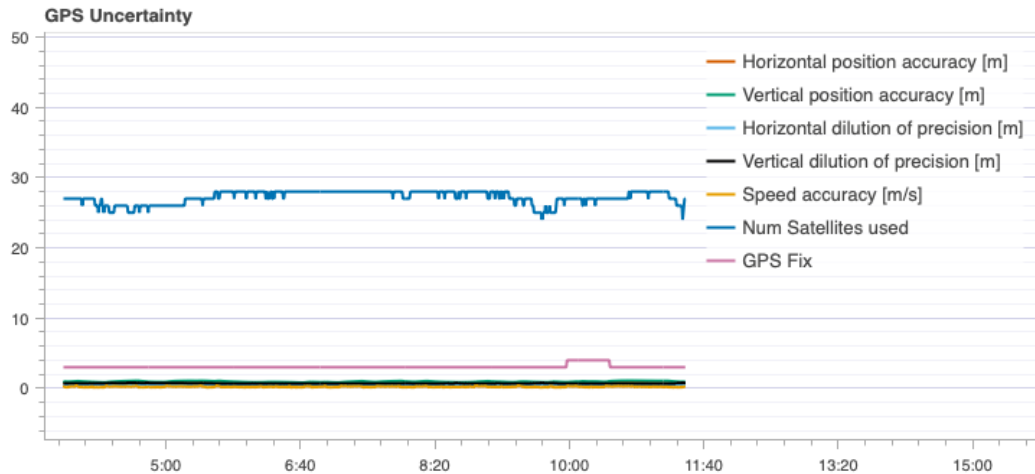


Obrázek 10: Zvýšené hodnoty vibrací letu č. 1 [15]



Obrázek 11: Akcelerace v jednotlivých osách autopilota letu č. 1 [15]

Vysoká míra vibrací je v prostředí bezpilotních systémů nežádoucí, protože může výrazně ovlivnit přesnost a spolehlivost sensorických dat, zejména akcelerometrů a gyroskopů. Tato data jsou nezbytná pro funkci stabilizačních a navigačních algoritmů a jejich narušení může vést ke špatnému řízení, oscilacím nebo falešným reakcím systému. Přestože při manuálním letu nejsou aktivní žádné stabilizační režimy, je možné z logu získat cenné informace o funkčnosti jednotlivých sensorů, kvalitě GPS signálu, výkyvech napájení, úrovni RC signálu a míře mechanických vibrací. Z tohoto letu bohužel nelze vyhodnotit chování regulačních smyček, odezvu autopilota ani výkon stabilizačních algoritmů, protože žádné aktivně nezasahují do řízení. První let tak sloužil výhradně jako mechanická verifikace návrhu a jako základ pro následnou úpravu hardwaru před testováním autonomních režimů. [9, 15]

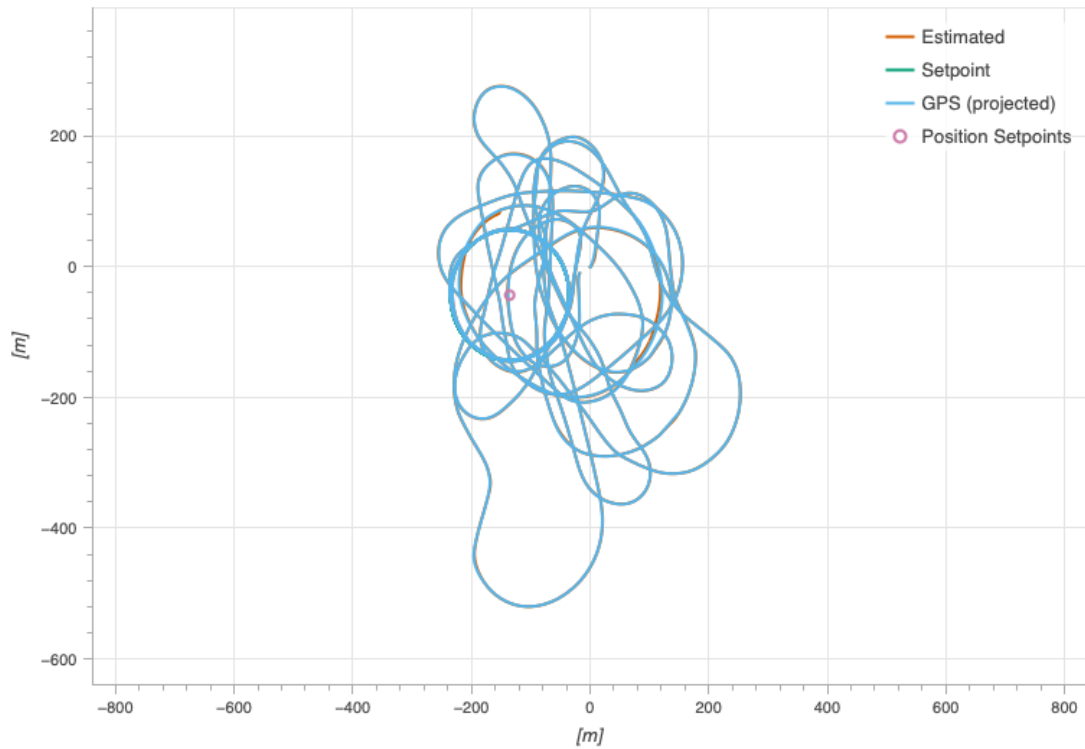


Obrázek 12: Data GPS letu č. 1 [15]

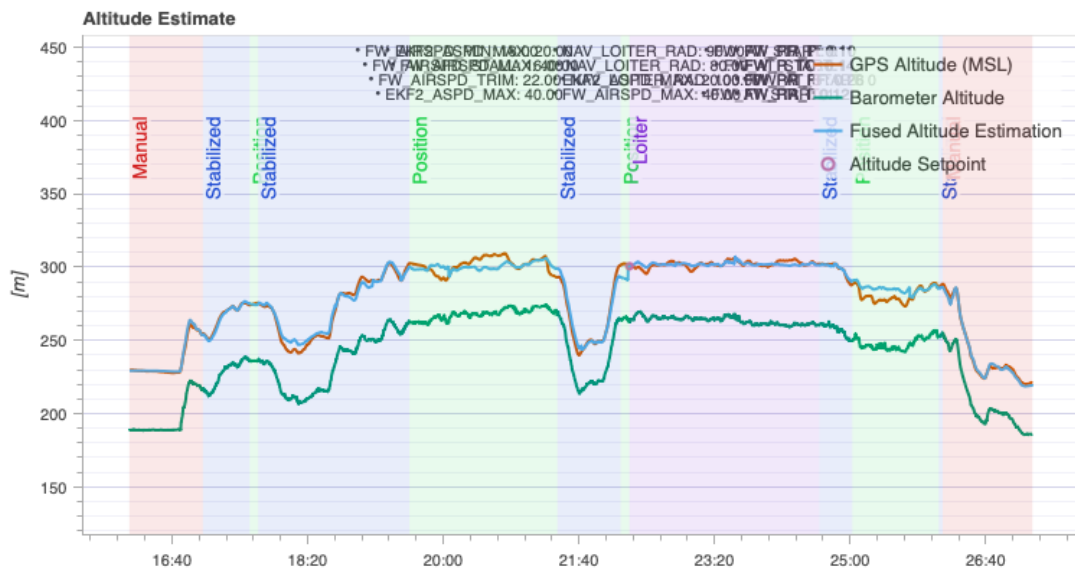
Kvalita GPS signálu velmi dobrá a stabilní, což potvrzuje i přiložený graf. Letoun po celou dobu udržoval 3D GPS fix, přičemž počet viditelných satelitů se pohyboval mezi 23 a 26, což je vysoce nad minimálním požadavkem pro spolehlivou navigaci. Horizontální a vertikální přesnost se držela kolem 0,5 metru a hodnoty DOP zůstávaly nízké, bez náhlých výkyvů. Tyto ukazatele svědčí o správném umístění GPS modulu s nerušeným výhledem na oblohu a absenci rušení od ostatní elektroniky. Kvalitní geolokační data zajišťují spolehlivý vstup pro fúzi senzorů v EKF a tvoří nezbytný základ pro následné testy režimů Position a Hold v dalších letech.

Druhý let – ověření stabilizačních režimů, pozice a autotune

Druhý let sloužil jako klíčová fáze testování navazující na mechanické ověření letounu během prvního letu. Hlavním cílem bylo ověření správné funkce stabilizačních režimů autopilota, otestování přechodů mezi různými letovými režimy a zároveň zahájení procesu ladění řízení pomocí nástroje autotune. Let byl realizován opět za stabilních atmosférických podmínek v odpoledních hodinách, za mírného proměnlivého větru s poryvy kolem 3–5 m/s, což poskytlo vhodné podmínky pro ověření schopnosti autopilota efektivně reagovat na poryvy a turbulence. Místo vzletu i přistání zůstalo stejné jako u předchozího letu.



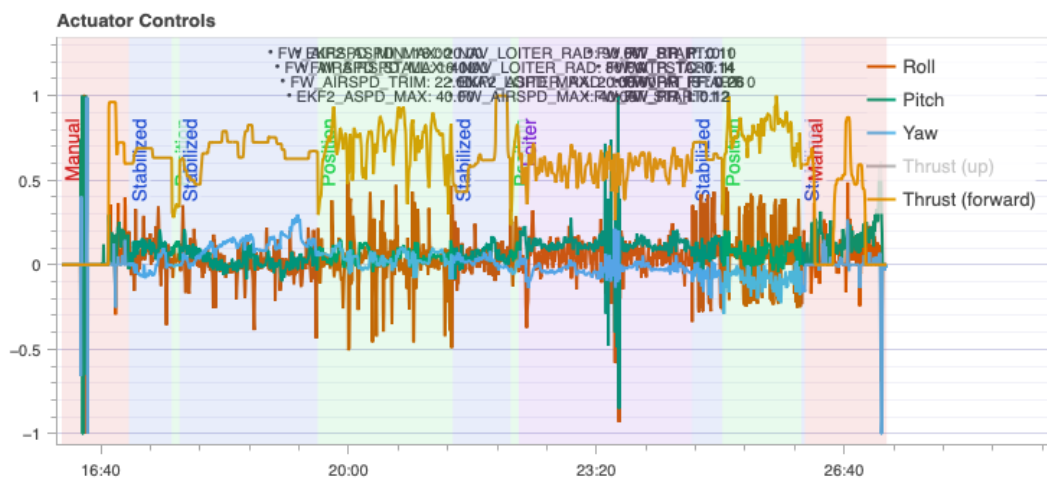
Obrázek 13: GPS projekce trasy letu č. 2 [16]



Obrázek 14: Odhad výšky letu č. 2 [16]

UAV bylo během startu řízeno v režimu Manual, tento režim je zásadní pro úvodní fázi letu, kdy operátor potřebuje přímou kontrolu nad strojem. Manuální režim umožnil bezpečné odpálení z katapultu, rychlé stabilizování trajektorie a nabytí potřebné výšky. Po vizuálním ověření správného chování UAV a dosažení požadované letové hladiny přistoupil operátor k přepnutí do režimu Stabilize s pomocí třípolohového přepínače na vysílači.

V režimu Stabilize převzal autopilot aktivní stabilizaci letounu pomocí údajů z IMU, čímž ulevil operátorovi od nutnosti manuálně kompenzovat odchylky způsobené například nárazy větru nebo drobnými turbulencemi. Letoun vizuálně vykazoval vyrovnané chování v osách pitch i roll a přechody mezi ručním řízením a stabilizovaným režimem probíhaly plynule. Nicméně, při podrobné analýze záznamu řízení z letového logu je patrné, že na výstupech aktuátorů docházelo k nadměrným oscilacím. Tyto rychlé výkyvy řídicích signálů naznačují, že PID regulátory byly příliš agresivně nastaveny, pravděpodobně s příliš vysokými hodnotami zisků P a D, což vedlo k přeregulaci. Přesto systém udržoval let stabilní, což svědčí o jeho robustnosti, nicméně s rezervou v efektivitě řízení.



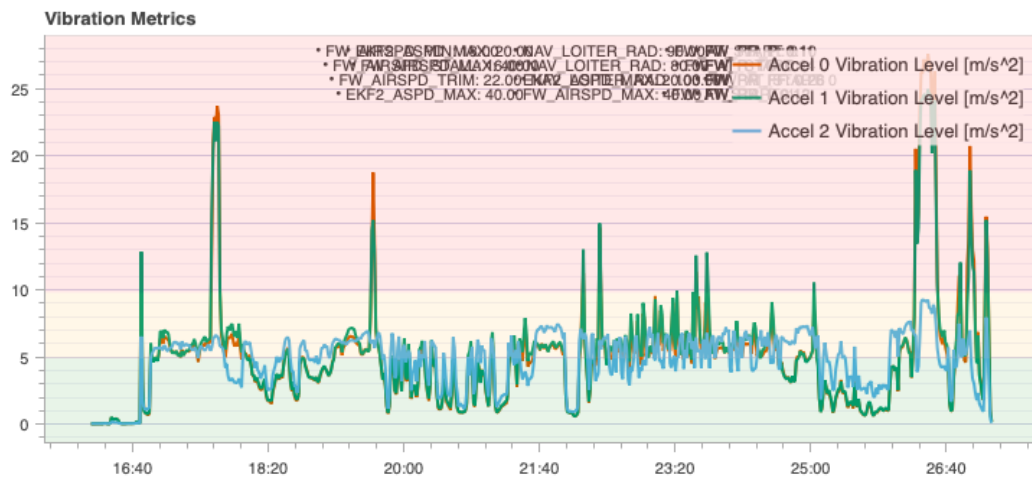
Obrázek 15: Graf ovládání aktuátorů letu č. 2 [16]

Po přepnutí do režimu Position, který kromě základní stabilizace přidává i polohové řízení na základě dat z GPS a barometrického výškoměru, letoun nadále úspěšně udržoval pozici a výšku v definovaných mezích. Horizontální odchylky nepřesáhly 2 metry a výšková stabilita zůstávala v toleranci ± 1 m. Nicméně i v tomto režimu přetrvávaly oscilace na řídicích kanálech, což potvrzuje, že nastavení PID smyček nebylo ještě optimální. Tyto poznatky vedly k rozhodnutí provést v dalším kroku autotune ladění, které mělo za cíl optimalizovat parametry regulátorů a zlepšit odezvu systému.

Po ověření schopnosti systému udržet stabilní let v režimech Stabilize a Position bylo UAV skrz GS přepnuto do režimu Hold. Tento režim navazuje na předchozí poloautonomní fáze a slouží jako vyčkávací režim, ve kterém UAV automaticky obíhá po předem definované kruhové trajektorii kolem bodu aktivace, přičemž autopilot aktivně reguluje směr, náklon, výšku i výkon motoru tak, aby byla zachována stabilní a předvídatelná trajektorie letu. Režim Hold je zvláště užitečný v situacích, kdy je potřeba získat čas k dalšímu rozhodnutí, například při přerušení

mise, přípravě nové trajektorie nebo ztrátě spojení. V rámci této stabilní fáze byl následně spuštěn proces autotune.

Autotune generuje za letu řízené výkyvy letounu ve všech třech osách a na základě odezvy systému ladí hodnoty PID tak, aby odpovídaly specifické dynamice konkrétního UAV. Z logu letu je patrné, že největší úpravy proběhly v ose pitch, kde byla snížena hodnota P a zvýšena hodnota D, čímž se dosáhlo lepší tlumení. V ose roll došlo k mírnému zvýšení integrální složky (I), která pomáhá udržet náklon v delších časových horizontech. Osa yaw vykazovala minimální změny, což potvrzuje její stabilitu během běžných letových manévřů. Výsledné hodnoty PID byly zaznamenány, ale systém je pro aktivaci aplikuje až po přistání, kdy má operátor možnost jejich revize a uložení. Dle záznamu nebylo během autotune zaznamenáno žádné překročení limitních hodnot aktuátorů ani nadměrné výkyvy, což svědčí o úspěšném ladění bez nutnosti zásahu operátora. [9, 16, 30]

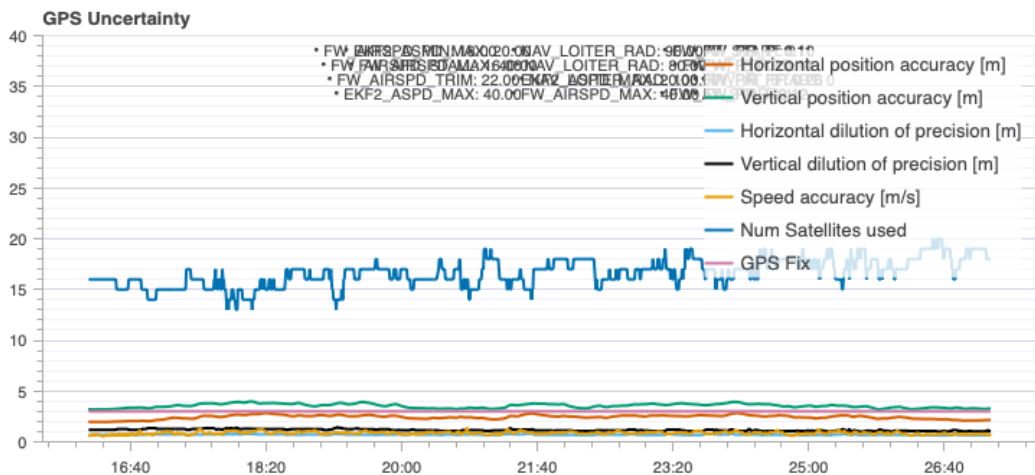


Obrázek 16: Hodnoty vibrací letu č .2 [16]



Obrázek 17: Akcelerace v jednotlivých osách autopilota letu č. 2 [16]

Během druhého letu byly opět monitorovány hodnoty vibrací pomocí dat z IMU jednotek a oproti prvnímu testu došlo ke zlepšení – spektrum vibrací bylo výrazně sníženo, zejména v ose Z. Výrazně přispěla výměna vrtule za nový kus od stejného výrobce, který byl přesněji vyvážen. Přesto se v logu letu objevovaly určité periodické složky vibrací, které naznačovaly, že problém s mechanickým rušením nebyl zcela eliminován. Po konzultaci a dalším testování bylo rozhodnuto přejít na vrtule od jiného výrobce, které nabídly vyšší přesnost výroby a výrazně lepší vyvážení. Tyto nové vrtule byly nasazeny až pro třetí let a měření ukázala dramatický pokles vibrací. [9, 16, 30]



Obrázek 18: Data GPS letu č. 2 [16]

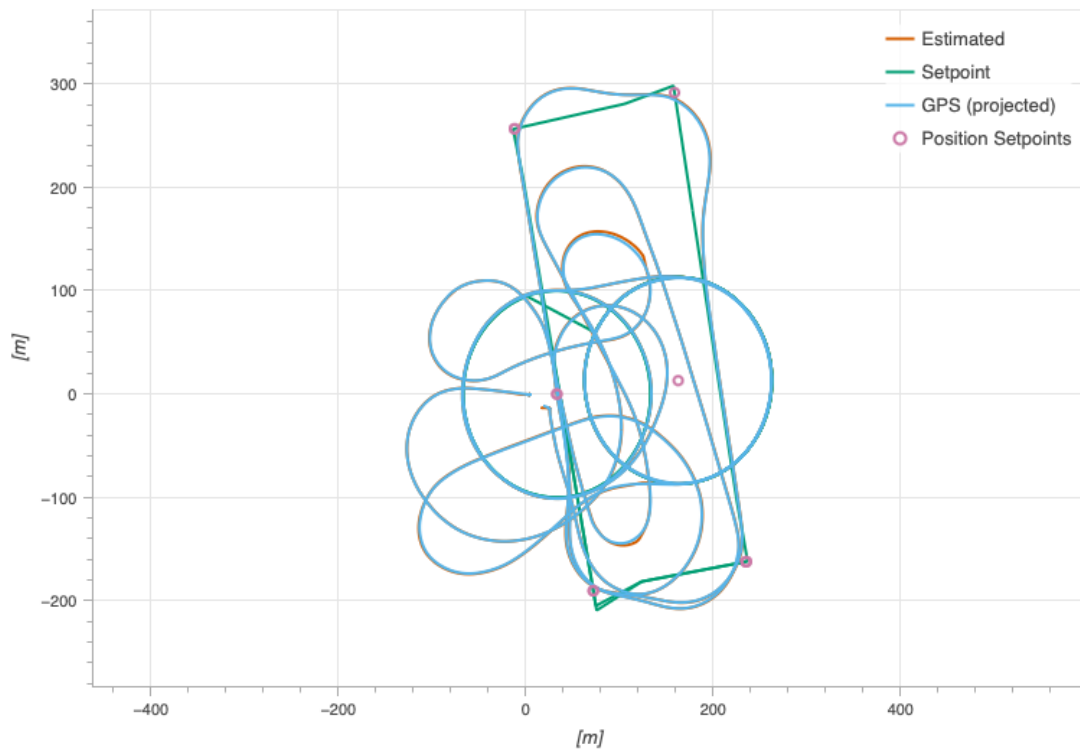
Záznam z letu č. 2 ukazuje, že i když si systém po většinu času udržoval 3D GPS fix, počet využívaných satelitů byl znatelně nižší než v předchozím letu – pohyboval se kolem 14 až 17. Přestože hodnoty horizontální a vertikální přesnosti zůstaly přijatelné (v rozmezí cca 1,0–1,5 m), mírně vyšší hodnoty HDOP i VDOP oproti prvnímu letu naznačují zhoršené podmínky pro

příjem GNSS signálu. Možnou příčinou pozorovaných odchylek ve kvalitě GPS signálu je elektromagnetické rušení způsobené činností telemetrického rádia pracujícího v pásmu 2.4 GHz. Při prvním letu bylo totiž toto rádio dočasně nahrazeno sériovým rádiem v pásmu 433MHz. Přestože toto pásmo leží mimo primární frekvenční pásma GNSS, může docházet ke vzniku intermodulačních produktů a širokopásmového šumu, které částečně zasahují do frekvenčního rozsahu, na nějž je GNSS přijímač citlivý. Tato interference mohla způsobit částečné degradování signálu. I přes tuto situaci systém fungoval stabilně a GPS vstupy poskytovaly dostatečnou kvalitu dat pro udržení režimů Position a Hold, přičemž žádné přerušení fixu nebylo zaznamenáno. Do budoucna by bylo vhodné zvážit větší odstínění nebo fyzické oddělení telemetrické a GNSS antény pro eliminaci tohoto rušení. [9, 16, 30]

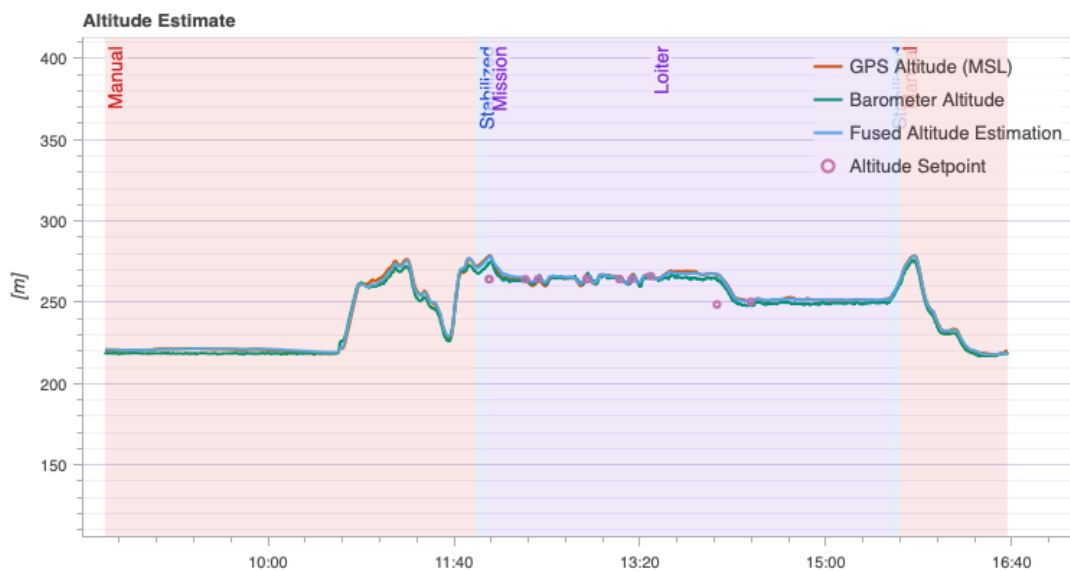
Let UAV prokázal schopnost systému plynule přecházet mezi různými letovými režimy (Manual, Stabilize, Position a Hold), potvrdil funkčnost stabilizační logiky i korektní činnost GPS navigace a dalších senzorických prvků. Zároveň ale odhalil nedostatky v počátečním nastavení PID regulátorů – zejména příliš vysoké hodnoty zisků na osách roll a pitch, které se projeví jako oscilace výstupních signálů během letu. Přestože tyto oscilace neměly kritický dopad na bezpečnost mise, mohly by snižovat efektivitu řízení a zvyšovat mechanické zatížení aktuátorů. Let by důležitý z důvodu spuštění procesu autotune, který byl úspěšně proveden v režimu Hold a sloužil k optimalizaci parametrů řízení. Druhý let tak nejen potvrdil základní funkčnost systému, ale vytvořil i kvalitní výchozí bod pro další testy, včetně plně autonomního letu realizovaného ve třetím testovacím letu.

Třetí let – ověření autonomie s novými PID parametry

Třetí let navazoval na úspěšné ladění stabilizačních smyček a měl za cíl komplexně ověřit chování letounu s nově nastavenými PID konstantami, a především prověřit schopnost systému vykonat plně autonomní misi definovanou pomocí GS. Let se uskutečnil na stejném testovacím polygonu jako předchozí lety, za podmínek mírného větru (cca 3–4 m/s). Tyto relativně klidné meteorologické podmínky umožnily soustředit se na vizuální kontrolu letu UAV.



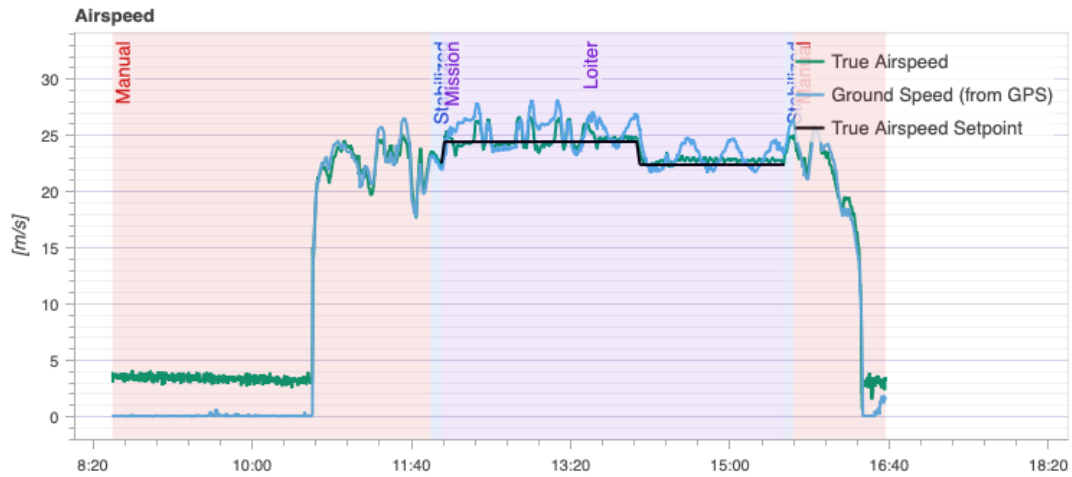
Obrázek 19: GPS projekce trasy letu č. 3 [17]



Obrázek 20: Odhad výšky letu č.3 [17]

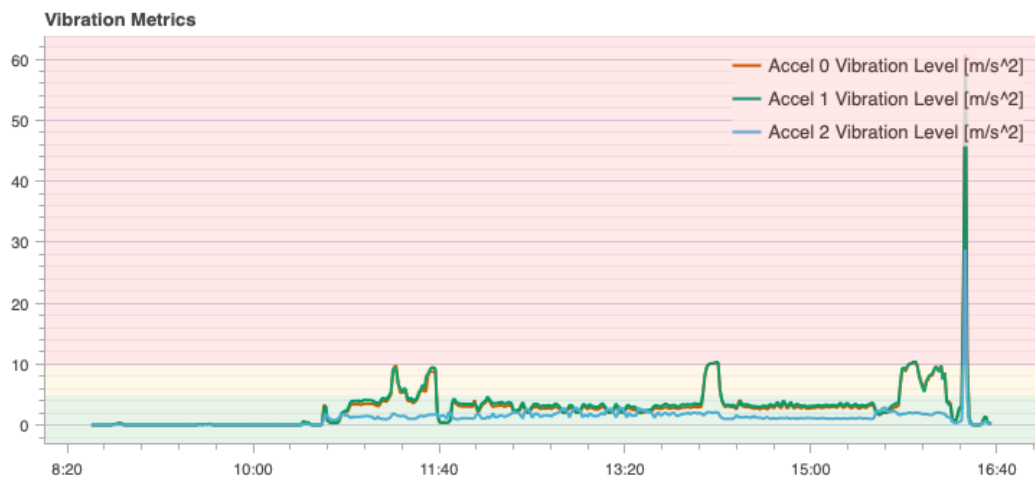
Letoun startoval opět z katapultu, po odpalu operátor provedl krátké manévrování v režimu Manual, aby zkontroloval reakce systému a ovladatelnost. Po stabilizaci letu následovalo přepnutí do režimů Stabilizace a následného aktivování režimu Mission, přičemž UAV automaticky přešlo do autonomie a začalo vykonávat misi složenou z čtyř navigačních bodů v konstantní výšce. Letoun úspěšně sledoval trasu, vykonával hladké přechody mezi body bez zjevných korekčních skoků a udržoval předdefinovanou rychlost. Trajektorie byla plynulá, s

minimálními odchylkami od plánovaných bodů. Graf výšky letu ukazuje minimální odchylky od požadované hladiny, výška oscilovala v rámci ± 1 m, což svědčí o správně fungujícím barometrickém i GNSS řízení.



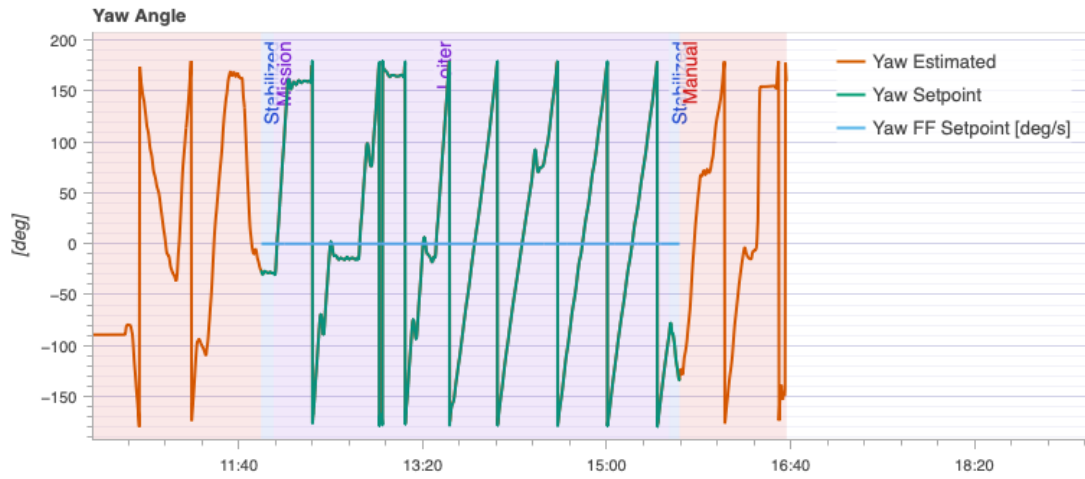
Obrázek 21: Průběh rychlosti v čase letu č. 3 [17]

Záznam z letu též indikuje stabilní rychlost při autonomii kolem bez skokových změn, i při změně směru letu.



Obrázek 22: Hodnoty vibrací letu č. 3 [17]

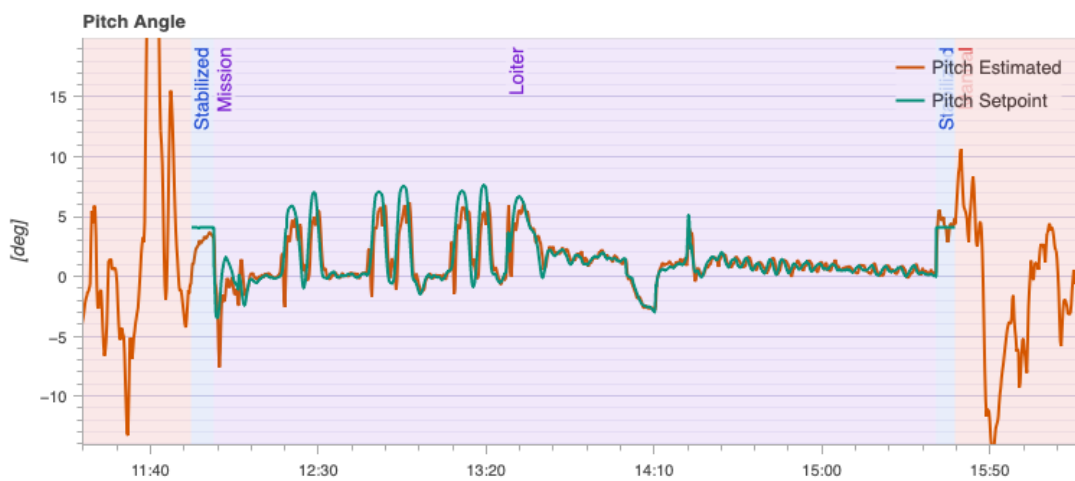
Graf vibrací ukazuje velmi nízké hodnoty vibrací ve všech osách, výrazně nižší než v letu č. 2. Tento pokles je výsledkem výměny vrtulí za komponenty jiného výrobce s lepší výrobní tolerancí, což výrazně přispělo ke klidnému letu a spolehlivému měření senzorů.



Obrázek 23: Průběh úhlu zatáčení v čase letu č. 3 [17]

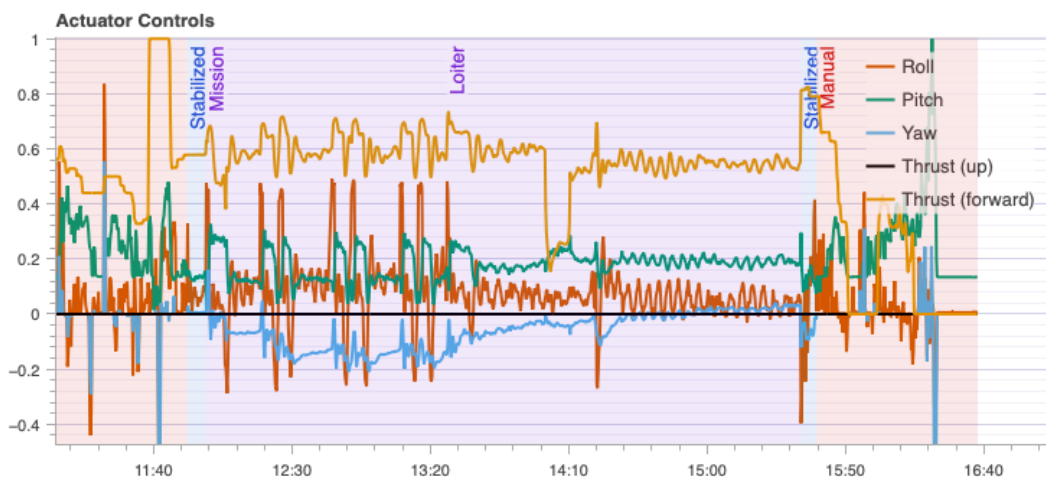


Obrázek 24: Průběh úhlu klopení v čase letu č. 3 [17]



Obrázek 25: Průběh úhlu klonění v čase letu č. 3 [17]

Analýza předchozích grafů potvrzuje stabilní chování UAV během všech testovaných letových režimů. V grafu Yaw Angle je patrná konzistence mezi odhadovaným natočením (Yaw Estimated) a žádanou hodnotou (Yaw Setpoint), a to zejména během režimů Mission a Loiter. Ve fázi Loiter, kdy UAV obíhá kolem daného bodu, lze pozorovat periodické změny směrového úhlu, které odpovídají kruhovému letu. Odchytky jsou plynulé a odpovídají očekávané trajektorii. V grafu Roll Angle je patrné, že řízení náklonu je velmi přesné. Odhadované hodnoty přesně kopírují požadavky autopilota bez výrazných výkyvů nebo oscilací. Náhlé změny v náklonu odpovídají přechodům mezi body mise a změnám směru. V grafu Pitch Angle je průběh ještě hladší, letoun se udržoval ve velmi stabilní kloněné poloze s minimálními odchylkami mezi odhadem a žádanou hodnotou. To svědčí o správně naladěných PID smyčkách a efektivní fúzi sensorických dat, zejména z IMU a GPS. Žádný z grafů neukazuje nežádoucí oscilace nebo nadměrné zásahy řídicí jednotky, což potvrzuje vysokou kvalitu regulace a stabilitu letových režimů. Tato data jednoznačně potvrzují, že systém je po třetím letu správně naladěný a připraven na nasazení v plně autonomních scénářích.



Obrázek 26: Graf ovládání aktuátorů letu č. 3 [17]

Při detailní analýze záznamu řízení, konkrétně v grafu Actuator Controls, se nicméně ukázalo, že i přes celkově stabilní chování letounu docházelo k mírným oscilacím ve výstupech na osách roll a yaw. Tyto výkyvy byly zřetelné především ve fázi letu v režimech Mission a Loiter, pravděpodobně jsou důsledkem stále mírně přeladěných PID parametrů, konkrétně příliš vysokého D zisku. Ačkoli tyto oscilace nejsou natolik závažné, aby způsobily ztrátu stability nebo bezpečnosti, zbytečně zvyšují pracovní zatížení serv a mohou nepříznivě ovlivnit efektivitu regulace. Na druhou stranu je nutno podotknout, že oproti předchozímu letu došlo k výraznému zlepšení, amplituda a četnost oscilací je nižší a odpovědi systému hladší. To

potvrzuje, že proces autotune měl pozitivní vliv na ladění smyček, i když finální doladění by mohlo ještě přinést další optimalizaci. Celkově lze let stále považovat za úspěšný, přestože byly zmíněné oscilace zřetelně patrné, jejich rozsah zůstává v toleranci běžné pro letouny tohoto typu při dynamickém řízení v autonomních režimech. Vzhledem k tomu, že nedošlo k žádnému negativnímu projevu na letové stabilitě, přesnosti řízení ani bezpečnosti provozu, a s ohledem na záměrné zvýšení citlivosti řízení z důvodu plánovaného testování přesnějších manévrů v dalších fázích experimentů, lze tyto oscilace v dané fázi vývoje považovat za akceptovatelné. Prozatím tedy nebudou dále upravovány řídicí parametry, aby nebyla narušena aktuálně fungující dynamika řízení. Dále by bylo ideální provést detailnější manuální doladění PID smyček na základě dalších letových testů, zejména v případě, že by pozorované oscilace začaly negativně ovlivňovat kvalitu letu, mechanickou zátěž aktuátorů nebo celkový výkon letounu při náročnějších autonomních misích. [9, 17]

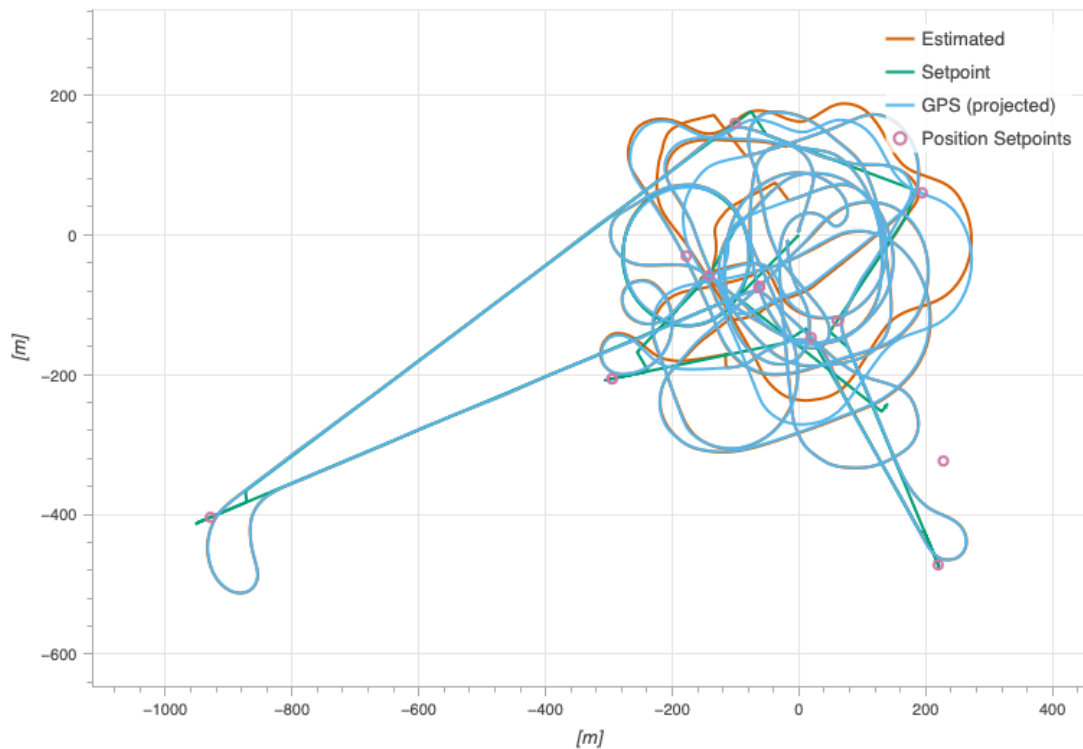
Let č. 4 – Ověření dosahu a spolehlivosti přenosu

Po předchozích úspěšných testech zaměřených na stabilizaci, autotune a autonomní létání byl čtvrtý testovací let navržen primárně jako zátěžová zkouška telemetrického a RC přenosu v reálných podmínkách. Cílem bylo ověřit spolehlivost komunikace mezi UAV a GS při postupně se zvětšující vzdálenosti. Test probíhal na otevřeném prostranství s minimálními překážkami, za jasného počasí, při bezvětří a dobré viditelnosti, což zajišťovalo ideální podmínky pro sledování UAV.

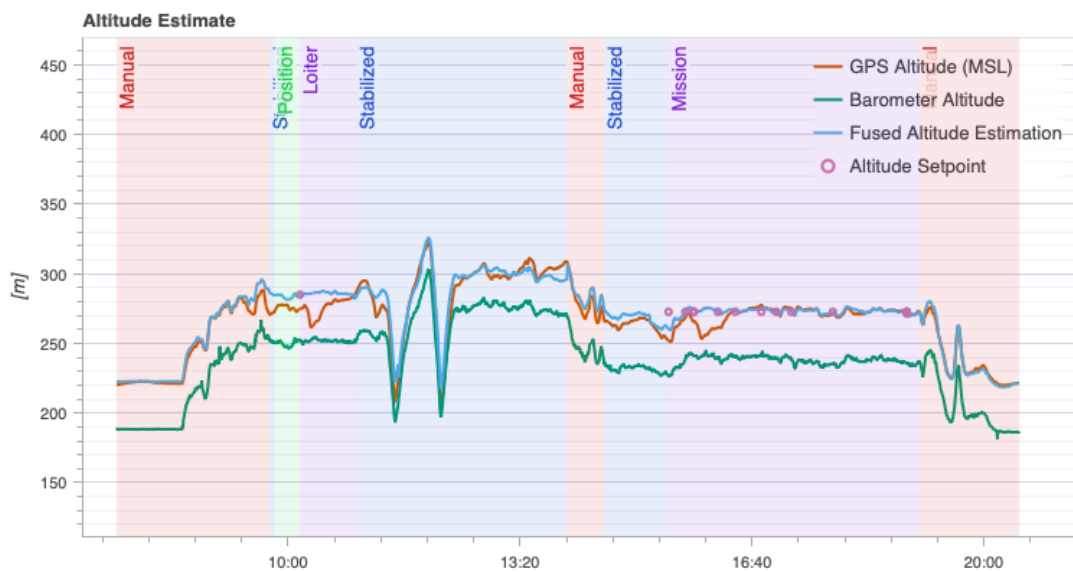
Letoun následoval naprogramovanou autonomní trasu, která jej postupně odváděla po přímé dráze od výchozí pozice až do maximální vzdálenosti 1 km. UAV během celé mise spoléhalo na navigaci pomocí GPS, autopilot zajišťoval řízení směru, výšky i rychlosti pomocí předem určených bodů trasy.

V tomto letu nebyly oproti předchozím změněny žádné zásadní parametry letounu, jednalo se o ověřovací opakování dlouhé autonomní mise se stejnou konfigurací PID parametrů jako při letu č. 3, tedy po úspěšné aplikaci autotune procesu. Primární snahou bylo ověřit konzistenci systému a jeho chování po delší době.

Z hlediska výpadků nedošlo k žádným záznamům poruch nebo odpojení telemetrie. RC signál si i při této vzdálenosti udržoval přijatelnou kvalitu a nebyla detekována aktivace failsafe.



Obrázek 27: GPS projekce trasy letu č. 4 [18]



Obrázek 28: Odhad výšky letu č.4 [18]

Co se týče komplexního spojení s rádiovým modulem 2.4GHz, v této chvíli běžela po této komunikaci data z kamery i telemetrie z FC. Během letu nenastal žádný zásadní výpadek telemetrie což svědčí o funkčnosti telemetrického spojení s upravenými rádií. I když nedošlo k celkovému výpadku, během testu nastalo pár momentů, kdy byl vidět znatelný rubber banding videa.

Rubber banding je jev, který se může objevit při přenosu videa v reálném čase, například z kamery umístěné na bezpilotním prostředku. Projevuje se trhavým nebo zpětným pohybem obrazu, kdy se streamovaný obsah na okamžik zpozdí a následně skokově dohání ztracená data. Tento efekt vzniká typicky při výpadcích nebo kolísání síťového spojení, kdy dochází ke ztrátám datových paketů nebo zvýšení latence v přenosové cestě. Příčinou může být přetížení sítě, nestabilní Wi-Fi spojení, nedostatečná šířka pásma nebo přetížení vyrovnávací paměti. V prostředí UAV může rubber banding výrazně ztížit ovládání při vizuální navigaci nebo zpožďovat reakce operátora na změny v okolí. Minimalizace tohoto jevu vyžaduje optimalizaci síťové infrastruktury, vhodné nastavení komprese a řízení přenosové latence, případně použití technik jako adaptivní bitrate nebo dedikované rádiové spoje s nízkou latencí.

Z pohledu letové dynamiky jsem se již plně nevěnoval detailní analýze chování jednotlivých řízených os, neboť hlavním cílem letu bylo prověřit robustnost přenosu. Ze záznamu řízení se nicméně potvrzuje, že řízení bylo stabilní, bez známek oscilací což svědčí o dobře nastavených PID parametrech přenesených z předchozího autotune procesu.

Tento let tedy úspěšně ověřil dosah a stabilitu přenosových technologií na VLOS a celkovou připravenost systému pro nasazení v širších scénářích. Zároveň zakončil sérii klíčových letových testů a poskytl jistotu o robustnosti a bezpečnosti komunikační infrastruktury UAV platformy. [9, 18]

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce si kladla za cíl navrhnout, realizovat a experimentálně ověřit univerzální řešení integrace elektroniky malého bezpilotního letounu s využitím otevřené platformy PX4. V průběhu řešení byly teoreticky zhodnoceny dostupné komponenty, navržena celková koncepce systému a následně fyzicky realizována funkční sestava zahrnující autopilota Cube Orange, companion computer Raspberry Pi 5, sensorický subsystém (GPS, airspeed, barometr), komunikační infrastrukturu a napájení. Výsledný systém byl integrován do letounu a úspěšně podroben sérii letových testů.

Výsledky realizace potvrdily plnou funkčnost navrženého systému. Elektronická sestava byla schopna zajišťovat stabilizaci, sběr sensorických dat a přenos telemetrie v reálném čase, přičemž bylo dosaženo stabilní komunikace mezi UAV a pozemní stanicí prostřednictvím modifikovaných rádií Ubiquiti Bullet AC. Datové přenosy probíhaly bez výpadků i při dynamickém zatížení systému, což svědčí o správné volbě komponent i mechanickém uspořádání v letounu.

Letové zkoušky ověřily nejen základní mechanické vlastnosti a provozuschopnost sestavy, ale také úroveň vibrací, chování autopilota ve stabilizačních režimech a kvalitu sensorických dat. Identifikace nadměrných vibrací během prvního letu vedla k výměně vrtule a úpravě uchycení autopilota, což výrazně přispělo ke zvýšení kvality dat z IMU a tím i ke stabilitě regulačních smyček. GPS modul Holybro M9N poskytoval vysoce přesnou polohovou informaci, přičemž přesnost zůstala po celou dobu letů v optimálním rozsahu. Výsledky ze senzorů měřících rychlost proudění vzduchu a barometrické výšky také vykazovaly konzistenci a spolehlivost. Ačkoliv nebyl vliv elektromagnetického rušení zcela odstraněn, byl značně minimalizován vhodným vedením kabeláže, použitím feritových filtrů a umístěním senzorů mimo silové prvky systému.

Navzdory dosaženým výsledkům práce otevírá prostor pro další rozvoj a zpřesnění systému. Především doladění PID smyček. V některých režimech letu, zejména při vyšších rychlostech nebo nárazovém větru, byly pozorovány mírné oscilace, které naznačují možnosti další optimalizace parametrů. Pro zvýšení přesnosti a stability řízení by bylo vhodné navázat na tuto práci podrobným testovacím plánem zahrnujícím manuální i automatizované ladění PID konstant a jejich vyhodnocení pomocí analytických nástrojů dostupných v rámci PX4 Flight Review nebo Matlab/Simulink.

Dalším logickým krokem ve vývoji systému je zprovoznění obousměrné komunikace mezi autopilotem a CC prostřednictvím protokolu MAVLink. Pro dosažení pokročilejších funkcí je nezbytné zajistit obousměrnou komunikaci těchto dvou prvků.

Této funkčnosti lze dosáhnout konfigurací MAVLink instance a následnému nastavením režimu Onboard na autopilotu pro předání řízení na CC. Na straně companion computeru je možné využít knihovny jako MAVSDK, pymavlink nebo MAVROS, které umožňují nejen příjem MAVLink zpráv, ale také jejich generování a odesílání zpět na autopilota. Pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti je vhodné doplnit skript pro detekci výpadku spojení a logování případných chyb.

Implementací této komunikace se výrazně rozšíří možnosti systému, od interaktivního řízení misí, rozhodovací logiku až po autonomní reakce na měnící se podmínky letu.

Další oblastí doporučenou k rozšíření testování je posouzení propustnosti a latence datové komunikace. Přestože během testovacích letů nedošlo k výpadkům spojení, chybí ale kvantitativní měření dostupné šířky pásma mezi UAV a pozemní stanicí. Pro tyto účely by bylo vhodné využít nástroj iPerf, který umožňuje provést reálné měření datového toku v obou směrech v různých zátěžových režimech. Získaná data by umožnila přesněji navrhnout priority síťového provozu, optimalizovat přenos obrazu a zhodnotit rezervu pro případné budoucí rozšíření systému. [32]

Přesnost a spolehlivost systému byly významně ovlivněny i fyzickými faktory návrhu, zejména rozmístěním komponent s ohledem na těžiště a aerodynamiku, stíněním napájecích a datových kabelů, uchycením antén a celkovým řízením elektromagnetické kompatibility. Bylo potvrzeno, že i drobné odchylky v mechanickém uspořádání mohou negativně ovlivnit kvalitu senzorických dat nebo stabilitu komunikace.

Závěrem lze říct, že byl vytvořen plně funkční, modulární systém integrace elektroniky pro malý UAV, který splňuje požadavky na spolehlivost, modularitu a opakovatelnost. Práce zároveň poskytuje uživatelskou zkušenost, která může sloužit jako praktický návod pro další vývojáře, výzkumníky i studenty v oblasti UAV systémů využívajících otevřenou architekturu PX4. Navržená koncepce tak může tvořit základ pro širší systémy, které budou klást vyšší nároky na autonomii, výpočetní kapacitu a datovou infrastrukturu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PX4. PX4 Autopilot User Guide Online. Dostupné z: <https://docs.px4.io/main/en/> [cit. 2025-04-13].
- [2] TEAM BLACKSHEEP. TBS CROSSFIRE Nano RX Online. Dostupné z: https://www.team-blacksheep.com/products/prod:crossfire_nano_rx [cit. 2025-05-07].
- [3] QGroundControl. QGroundControl user guide Online. Dostupné z: <https://docs.qgroundcontrol.com/> [cit. 2025-04-13].
- [4] Auterion. The history of Pixhawk Online. Dostupné z: <https://auterion.com/company/the-history-of-pixhawk/> [cit. 2025-05-04].
- [5] RFDesign. RFDesign Pty Ltd store Online. Dostupné z: <https://store.rfdesign.com.au/radio-modems/> [cit. 2025-05-04].
- [6] Ubiquiti. UniFi store airMAX Bullet AC product page Online. Dostupné z: <https://eu.store.ui.com/eu/en/category/wireless-airmax-5ghz/products/b-db-ac> [cit. 2025-05-04].
- [7] Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi Online. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/> [cit. 2025-05-06].
- [8] NVIDIA. Nvidia Robotics and Edge AI Online. Dostupné z: <https://www.nvidia.com/en-eu/autonomous-machines/embedded-systems/> [cit. 2025-05-06].
- [9] PX4. PX4 Log Analysis using Flight Review Online. Dostupné z: https://docs.px4.io/main/en/log/flight_review.html [cit. 2025-05-06].
- [10] Unmanned Systems Technology. Antenna Recommendations for UAS Online. Dostupné z: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/antenna-recommendations-for-uas/> [cit. 2025-05-06].
- [11] TAOGLAS. FXP832 Freedom Flexible PCB Antenna Online. Dostupné z: <https://www.taoglas.com/product/freedom-fxp832-2-44-9-6-0ghz-flex-pcb-antenna/> [cit. 2025-05-06].
- [12] MAPLE WIRELESS. 2.4GHz 9dBi Panel Antenna Online. Dostupné z: http://www.maple-wireless.com/bk_25380727.html [cit. 2025-05-06].

- [13] FlyEye. What is EMI? Online. Dostupné z: <https://www.flyeye.io/drone-acronym-emi/> [cit. 2025-05-06].
- [14] Element14. Vector Network Analyzer (VNA): A Practical Getting-Started Guide for the General Reader Online. Dostupné z: <https://community.element14.com/technologies/test-and-measurement/b/blog/posts/vector-network-analyzer-vna-a-practical-getting-started-guide-for-the-general-reader>
- [15] PX4 Flight Review. Let 1 Online. Dostupné z: https://review.px4.io/plot_app?log=0db3ecb2-f276-4c98-b6f4-e2a4c79cc131 [cit. 2025-05-06].
- [16] PX4 Flight Review. Let 2 Online. Dostupné z: https://review.px4.io/plot_app?log=fc403181-d132-4adf-8b22-b51304c1bd7d [cit. 2025-05-06].
- [17] PX4 Flight Review. Let 3 Online. Dostupné z: https://review.px4.io/plot_app?log=88531a03-ad7b-426f-9ebb-0e6224fd180b [cit. 2025-05-06].
- [18] PX4 Flight Review. Let 4 Online. Dostupné z: https://review.px4.io/plot_app?log=b0182b6d-ee79-4e68-8874-4dbd45c0e654 [cit. 2025-05-06].
- [19] Wikipedia. Next Unit of Computing Online. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Next_Unit_of_Computing [cit. 2025-05-06].
- [20] Ardupilot. Ardupilot official site Online. Dostupné z: <https://ardupilot.org> [cit. 2025-05-06].
- [21] GitHub. INAV - navigation capable flight controller Online. Dostupné z: <https://github.com/iNavFlight/inav> [cit. 2025-05-06].
- [22] HOLYBRO. M9N GPS module Online. Dostupné z: <https://holybro.com/products/m9n-gps> [cit. 2025-05-07].
- [23] HOLYBRO. Digital Air Speed Sensor - MS4525DO Online. Dostupné z: <https://holybro.com/products/digital-air-speed-sensor-ms4525do> [cit. 2025-05-07].

- [24] PX4. CubePilot gege Overview Online. Dostupné z:
https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/cubepilot_cube_orange.html [cit. 2025-05-07].
- [25] HIKVISION. DS-2CD2D45G1/M-D/NF Online. Dostupné z:
<https://www.hikvision.com/en/products/IP-Products/Network-Cameras/Special-Series/ds-2cd2d45g1-m-d-nf/> [cit. 2025-05-07].
- [26] MAVLink Developer Guide. Online. MAVLink, 2025. Dostupné z:
<https://mavlink.io/en/> [cit. 2025-05-07].
- [27] MAVLink. Online. Wikipedia. Poslední aktualizace 2025. Dostupné z:
<https://en.wikipedia.org/wiki/MAVLink> [cit. 2025-05-07].
- [28] Wikipedia. Simultaneous localization and mapping. Online. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_localization_and_mapping [cit. 2025-05-07].
- [29] ArduPilot. Extended Kalman Filter Navigation Overview and Tuning. Online. Dostupné z:
<https://ardupilot.org/dev/docs/extended-kalman-filter.html> [cit. 2025-05-07].
- [30] PX4. Autotune. Online. PX4 Autopilot User Guide. Dostupné z:
<https://docs.px4.io/v1.14/en/config/autotune.html> [cit. 2025-05-07].
- [31] PX4. Safety settings (Failsafe). Online. PX4 Autopilot User Guide. Dostupné z:
<https://docs.px4.io/main/en/config/safety.html> [cit. 2025-05-07].
- [32] iPerf. iPerf – The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP. Online. Dostupné z:
<https://iperf.fr> [cit. 2025-05-07].
- [33] Wikipedia. Simultaneous localization and mapping. Online. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_localization_and_mapping [cit. 2025-05-8].
- [34] INTERTEC-Hess GmbH. GRP – Glass fiber reinforced polyester. Online. Dostupné z:
<https://www.intertec.info/en/grp/> [cit. 2025-05-12].