



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## NÁVRH ŘÍZENÍ DRONU PŘES OPTICKÉ VLÁKNO

DESIGN OF DRONE CONTROL VIA OPTICAL FIBER

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Dřínovský

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Králík, Ph.D.

BRNO 2026

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Marek Dřínovský</b>
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Králík, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2025/26

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh řízení dronu přes optické vlákno

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ač řízení dronu přes optické vlákno je hlavně známo pro své vojenské použití, je to systém, který lze použít i pro technické aplikace pro kontrolu a průzkum oblastí, kde klasické bezdrátové řízení není použitelné buď z hlediska ztráty signálu, nebo bezpečnosti. Díky okamžitému přenosu signálu má operátor okamžitou vizuální kontrolu situace a může si problémová místa lépe zdokumentovat, tedy lze dosáhnout lepších výsledků v rámci prediktivní údržby. výstupem práce je tedy navrhnout komunikační jednotky na straně ovladače a přijímače umožňující řízení dronu, či jiného mobilního robotu na druhém konci. Jednotka musí umět souběžně přenášet příkazy od ovladače ke dronu a zároveň zpětný přenos obrazu a měřených dat. Předpokládaná vzdálenost pro komunikaci mezi jednotkami je do 1 000 m.

### Cíle bakalářské práce:

1. Provedte rešerši stávajících softwarových a hardwarových řešení komunikace po optickém vláknu pro mobilní robotiku.
2. Navrhněte komunikační strukturu.
3. Navrhněte jednotky pro zpracování signálu na straně ovladače i zařízení (dronu) pro komunikaci přes optické vlákno.
4. Otestujte řešení na reálném zařízení.

**Seznam doporučené literatury:**

[1] VALÁŠEK, M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT 1995.

[2] SMITH, Steven W. Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists. . Amsterdam : Newnes, c2003. ISBN 0-7506-7444-X.

[3] MOHANTY, Sachi Nandan, RAVINDRA, J. V. R., SURYA NARAYANA, G., PATTNAIK, Chinmaya Ranjan and SIRAJUDEEN, Yoosuf Mohamed (eds.). Drone technology: future trends and practical applications. . Hoboken, NJ, USA : Wiley, [2023]. ISBN 978-1-394-16653-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem systému řízení dronu prostřednictvím optického vlákna. Cílem práce je vytvořit komunikační řešení umožňující spolehlivý obousměrný přenos řídicích povelů a obrazových dat na vzdálenost až 1000 m. Práce obsahuje rešerši současných hardwarových i softwarových řešení pro komunikaci v mobilní robotice se zaměřením na přenos dat po optickém vláknu. Na základě této analýzy je navržena komunikační struktura a jednotlivé jednotky systému na straně ovladače i zařízení.

## Summary

This bachelor's thesis deals with the design of a drone control system using optical fiber. The aim of this work is to create a communication solution enabling reliable bidirectional transmission of control commands and video data over distances of up to 1000 m. The thesis includes a review of existing hardware and software solutions for communication in mobile robotics, with a focus on data transmission via optical fiber. Based on this analysis, the communication structure and individual system units on both the operator and vehicle side are proposed.

## Klíčová slova

dron, optické vlákno, řízení dronu, dálkové ovládání, tethered systém

## Keywords

drone, optical fiber, drone control, remote control, tethered system

## Bibliografická Citace

DŘÍNOVSKÝ, M. *Návrh řízení dronu přes optické vlákno*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026. 47 s., Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Králík, Ph.D..

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a uvedl jsem všechny použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

**Marek Dřínovský**

Brno . . . . .

. . . . .

Děkuji vedoucímu práce Ing. Janu Králíkovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícný přístup po celou dobu řešení práce, zejména za takřka okamžitou reakci na konzultační dotazy. Dále děkuji svým kolegům za příjemné studijní prostředí, díky kterému bylo bakalářské studium relativně klidnou záležitostí a v neposlední řadě své rodině a blízkým za trvalou podporu během studia i plnění mých životních plánů.

**Marek Dřínovský**

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>8</b>
<b>2 Rešerše</b>	<b>9</b>
2.1 Optické vlákno pro komunikační účely . . . . .	9
2.1.1 Princip přenosu po optickém vlákně . . . . .	9
2.1.2 Typy optických vláken a jejich vlastnosti . . . . .	11
2.2 Existující řešení . . . . .	13
2.3 Implementace komunikace do řízení dronu . . . . .	15
<b>3 Návrh a realizace systému</b>	<b>19</b>
3.1 Návrh systému . . . . .	19
3.2 Testovací platforma . . . . .	20
3.2.1 Stabilizační systémy . . . . .	22
3.2.2 Redundantní řízení . . . . .	23
3.3 Komunikační struktura . . . . .	24
3.3.1 Videopřenos . . . . .	25
3.4 Napájení systému . . . . .	27
3.5 Mechanické řešení . . . . .	29
3.5.1 Příprava optického vlákna . . . . .	29
3.5.2 Obálka návinnu vlákna a komponent . . . . .	32
<b>4 Testování a měření</b>	<b>34</b>
4.1 Měření latence videa . . . . .	34
4.2 Testovací let . . . . .	35
4.2.1 Legislativní aspekty . . . . .	35
4.2.2 Provedení zkušebního letu . . . . .	35
<b>5 Závěr</b>	<b>37</b>
<b>Seznam zkratk</b>	<b>38</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>40</b>
<b>Literatura</b>	<b>41</b>
<b>Obsah přílohy</b>	<b>47</b>

# 1 Úvod

V posledních letech došlo k výraznému rozšíření bezpilotních prostředků napříč širokým spektrem aplikací – od zásilkových služeb přes zemědělství až po průzkum nebezpečných oblastí. Zásadní roli v tomto vývoji sehrály zejména moderní konflikty, ve kterých se drony staly klíčovým nástrojem a jejich masové nasazení přineslo rychlý technologický pokrok, miniaturizaci komponent a výrazné snížení pořizovacích nákladů. To, co bylo ještě před dekádou doménou armád, je dnes dostupné kutilům v garáži.

Vedle klasicky bezdrátově řízených dronů se v posledních letech začínají prosazovat systémy využívající fyzické komunikační propojení prostřednictvím optického vlákna. Tento přístup přináší zásadní výhodu v podobě odolnosti vůči elektronickému rušení, které se stalo běžnou součástí moderního bojového i průmyslového prostředí. Optické vlákno umožňuje spolehlivý přenos dat i tam, kde jsou rádiové frekvence silně degradovány nebo zcela nefunkční – ať už záměrným rušením nebo elektromagnetickými vlastnostmi prostředí.

Zkušenosti z vojenského nasazení ukazují, že tato technologie má značný potenciál i v civilním sektoru. Inspekce uzavřených průmyslových hal, průzkum podzemních prostor, monitoring kritické infrastruktury v rušeném prostředí – to jsou jen některé z oblastí, kde nerušitelné optické spojení otevírá možnosti, které bezdrátová řešení neumožňují. Motivací pro tuto práci bylo právě toto přesvědčení: že technologie, která vznikla na bojišti, může nalézt smysluplné uplatnění i jinde.

Cílem práce je analyzovat možnosti využití optického komunikačního propojení u bezpilotních prostředků, navrhnout vlastní řešení postavené na dostupných komponentách a ověřit jeho vlastnosti experimentálně v reálných podmínkách. Výsledkem je funkční prototyp, který vznikl od návrhu elektroniky přes přípravu optického vlákna až po zkušební lety.

## Využití generativní AI

Při zpracování této práce byl využit nástroj generativní umělé inteligence Claude (Anthropic, verze Sonnet 4) v následujících oblastech: jazyková korektura a stylistická kontrola textu, podpora při práci v prostředí  $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  včetně ladění chyb kompilace a asistence při vyhledávání chyb ve zdrojovém kódu. Veškerý odborný obsah, návrh systému, realizace a interpretace výsledků jsou výhradně dílem autora. Evidence použitých promptů je uvedena v digitální příloze práce.

## 2 Rešerše

Tato kapitola poskytuje přehled poznatků nezbytných pro návrh systému řízení dronu prostřednictvím optického vlákna. V první části jsou popsány fyzikální principy přenosu světla optickým vláknem, používaný doprovodný hardware a vlastnosti jednotlivých typů vláken z hlediska jejich vhodnosti pro nasazení na létajícím prostředku. Druhá část se věnuje přehledu existujících řešení – od komerčních tethered dronů po systémy aktivně nasazované v ozbrojených konfliktech (sekce 2.2). Závěrečná část kapitoly popisuje hardwarovou a softwarovou architekturu moderních dronů a způsoby, jakými je do těchto systémů komunikace po optickém vlákně integrována.

### 2.1 Optické vlákno pro komunikační účely

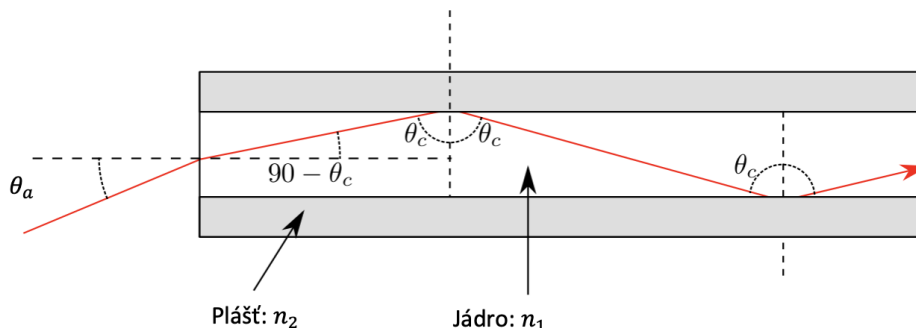
#### 2.1.1 Princip přenosu po optickém vlákně

Základem funkce vlákna je jev úplného vnitřního odrazu (TIR). Jádrem vlákna má vyšší index lomu  $n_1$  než obklopující plášť s indexem  $n_2$ , přičemž  $n_1 > n_2$ . Paprsek šířící se jádrem se na rozhraní jádro–plášť zcela odrazí zpět do jádra, pokud jeho úhel dopadu překročí kritický úhel  $\theta_c$ , kde  $\sin \theta_c = n_2/n_1$  [1].

Aby byl paprsek vstupující do vlákna z vnějšího prostředí (vzduch,  $n_0 = 1$ ) veden celou délkou vlákna, musí dopadat na čelní plochu vlákna pod úhlem *menším*, než je akceptační úhel  $\theta_a$ . Ten je definován vztahem

$$\text{NA} = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.1)$$

kde NA označuje numerickou aperturu vlákna [1]. Paprsky dopadající pod úhlem větším než  $\theta_a$  sice do vlákna vstoupí, avšak na rozhraní jádro–plášť nesplní podmínku TIR a do pláště uniknou.



Obrázek 2.1: Akceptační kužel a numerická apertura optického vlákna; paprsky v mezích úhlu  $\theta_a$  jsou vedeny jádrem úplným vnitřním odrazem, převzato a upraveno z [2].

**Útlum signálu** I v případě splnění podmínky TIR dochází k postupné degradaci signálu v závislosti na vlnové délce a typu materiálu. Celková střední atenuace přímého spojení bez ohybů  $A$  je dána vztahem

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_c y, \quad (2.2)$$

kde  $\alpha$  je střední koeficient útlumu vlákna,  $L$  délka trasy,  $\alpha_s$  střední ztráta na svaru,  $x$  počet svarů,  $\alpha_c$  střední ztráta na konektoru a  $y$  počet konektorů v trase [3]. Pro délku trasy 1000 m vlákna typu G.652 (ekvivalentně G.657), vlnovou délku v pásmu C (1530-1565 nm) a tomu odpovídají útlum vlákna 0,30 dB/km (maximální hodnota dle [3]) představuje příspěvek samotného vlákna pouhých 0,30 dB, tedy hodnotu naprosto zanedbatelnou. Dominantní složkou útlumu celého systému tak budou konektorová spojení na obou koncích optické trasy; jejich přípravě a dosažené kvalitě se podrobněji věnuje sekce 3.5.1.

### Doprovodný hardware

Samotné optické vlákno přenáší světlo, avšak pro integraci do systémů postavených na síťové komunikaci jsou nezbytné převodní prvky. Níže jsou popsány tři klíčové komponenty.

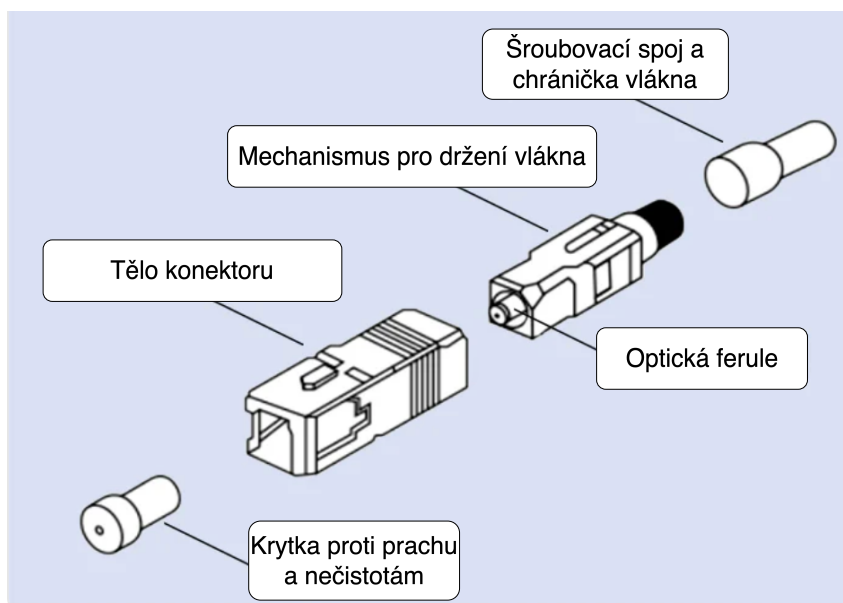
**Mediakonvertory a SFP moduly** Převod mezi elektrickým signálem (Ethernet, RJ-45) a optickým signálem zajišťují mediakonvertory – zařízení transparentně propojující dvě Ethernetová zařízení přes optickou trasu bez nutnosti jakékoli úpravy vyšších komunikačních vrstev (IP, TCP/UDP). Klíčovou součástí každého mediakonvertoru je SFP (Small Form-factor Pluggable) transceiver, který integruje laserovou diodu i fotodetektor a zajišťuje samotný převod elektrického signálu na optický a zpět [4]. Transceiver může být buď pevně zabudován přímo v těle zařízení, nebo vložen do standardizovaného slotu, který umožňuje jeho výměnu.

V prvním případě jsou vlnové délky vysílání a příjmu pevně dány výrobcem a optický konektor je přímou součástí konstrukce zařízení. Příkladem je TP-Link MC211CS-20 s konektorem SC, který využívá technologii WDM a přenáší oba směry komunikace po jediném vlákně na vlnových délkách 1550 nm a 1310 nm [5]. Volba těchto vlnových délek odpovídá lokálnímu (1.3  $\mu\text{m}$ ) a globálnímu (1.55  $\mu\text{m}$ ) minimu útlumu křemenného skla v závislosti na vlnové délce záření [6, s. 894].

Ve druhém případě poskytuje zařízení standardizovaný slot dle INF-8074i [4], do něž lze vložit libovolný kompatibilní SFP modul. Výhodou je flexibilita – výměnou modulu lze změnit vlnovou délku, dosah nebo typ konektoru bez výměny celého mediakonvertoru. Obdobně jako u zařízení s pevnou optikou existují BiDi (bidirectional) SFP moduly, které multiplexují oba směry přenosu na různých vlnových délkách do jediného vlákna, čímž snižují hmotnost kabelu neseného dronem.

**Konektory optických vláken** Pro zakončení optického vlákna se používají specializované konektory, jejichž základní stavbu ilustruje obrázek 2.2. Hlavními částmi konektoru jsou tělo zajišťující mechanické uchycení do zásuvky protistrany, mechanismus pro fixaci a držení vlákna, šroubovací spoj s chráničkou vlákna pro odlehčení tahu na samotném vlákně, a zejména optická ferule – precizně vyrobený keramický nebo skleněný váleček. Ferule zajišťuje souosé vyrovnání dvou vláken při spojení a je proto nejcitlivější součástí

konektoru. Pro ochranu jejího čela před nečistotami je v odpojeném stavu nasazena prachová krytka.



Obrázek 2.2: Konstrukce optického konektoru typu SC – tělo konektoru, mechanismus pro držení vlákna, šroubovací spoj s chráničkou a optická ferule s prachovou krytkou, převzato a upraveno z [7].

Existuje několik typů konektorů lišících se rozměry a mechanickým provedením. Mezi nejběžnější patří SC (Subscriber Connector) s ferulí průměru 2.5 mm a zásuvným mechanismem push-pull, kompaktnější LC (Lucent Connector) s ferulí 1.25 mm používaný ve stísněných prostorech, a FC (Ferrule Connector) se závitovým zajištěním vhodný pro měřicí techniku.

Kromě typu konektoru je zásadní způsob leštění čela vlákna ve feruli, který určuje kvalitu optického kontaktu mezi dvěma spojovanými konektory. Provedení PC (Physical Contact) zajišťuje základní fyzický kontakt se zpětným odrazem okolo  $-40$  dB, UPC (Ultra Physical Contact) dosahuje díky jemnějšímu leštění typicky  $-50$  dB, a APC (Angled Physical Contact) s čelem vlákna zkoseným pod úhlem  $8^\circ$  pak hodnot lepších než  $-60$  dB [8].

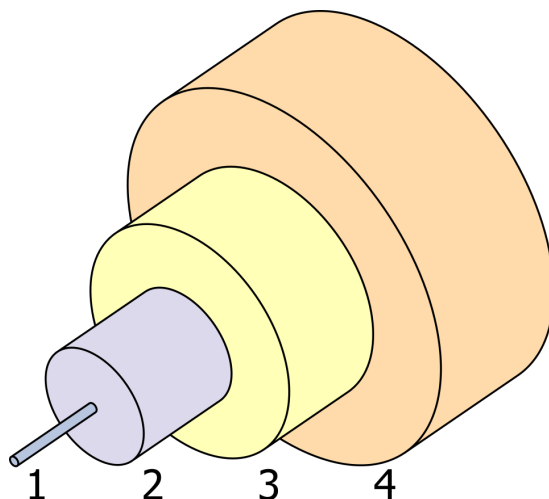
Pro účely této práce byly zvoleny konektory **SC/UPC**. Typ SC byl preferován pro svou robustnost a jednoduchou manipulaci, přičemž leštění UPC představuje oproti APC výrazně tolerantnější technologii z hlediska přesnosti zalomení vlákna při ruční výrobě.

### 2.1.2 Typy optických vláken a jejich vlastnosti

Optická vlákna se vyrábějí převážně z křemenného skla ( $\text{SiO}_2$ ), jehož vysoká optická čistota a chemická stabilita zajišťují nízký útlum a dlouhou životnost. Vlákna se dělí do dvou základních skupin podle počtu vidů světla, které jsou schopna vést: jednovidová (single-mode, SM) a mnohovidová (multimode, MM). Vid je specifické řešení Helmholtzových rovnic představující samokonzistentní rozložení elektromagnetického pole ve vlnovodu [9]. Počet podporovaných vidů závisí především na průměru jádra a rozdílu indexů lomu jádra a pláště. Volba vhodného typu má přímý dopad na přenosové vlastnosti i mechanické chování vlákna, což je při nasazení na dronu klíčový parametr.

### Jednovidové vlákno (Singlemode)

Jednovidové vlákno má velmi malý průměr jádra – typicky  $8\ \mu\text{m}$  až  $10\ \mu\text{m}$  – který umožňuje šíření pouze jediného vidu světla. Tím je zcela potlačena vidová disperze, a vlákno proto dosahuje výrazně vyšší přenosové kapacity než vlákno mnohovidové na větší vzdálenosti ( $>1000\ \text{m}$ ). Nevýhodou je vyšší citlivost na přesnost konektování a potřeba laserových zdrojů s užším spektrem, čímž je násobně dražší oproti systémům s mnohavidovým vláknem.



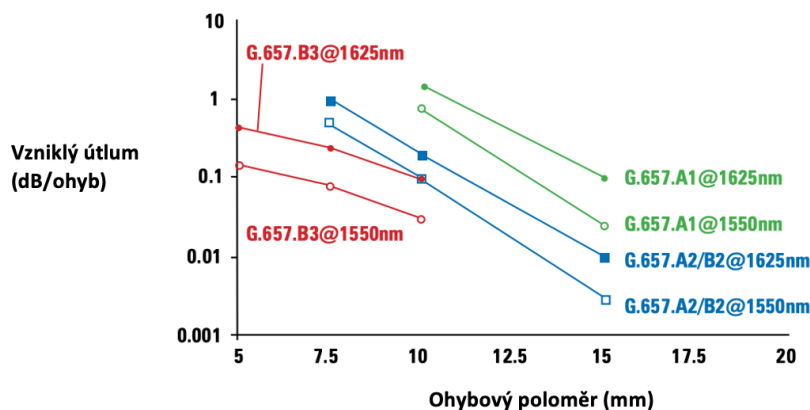
Obrázek 2.3: Vrstvy jednovidového vlákna jejich průměry, převzato z [10]: 1 – jádro ( $8\ \mu\text{m}$ – $10\ \mu\text{m}$ ), 2 – plášť ( $125\ \mu\text{m}$ ), 3 – ochranná vrstva – buffer ( $250\ \mu\text{m}$ ), 4 – vnější obal ( $900\ \mu\text{m}$ ).

### Mnohavidové vlákno (Multimode)

Mnohavidová vlákna mají průměr jádra  $50$  nebo  $62.5\ \mu\text{m}$ , což usnadňuje optické spojování a umožňuje použití levnějších LED nebo VCSEL zdrojů. Na druhou stranu vidová disperze omezuje přenosovou šířku pásma zejména při větších vzdálenostech. Mnohavidové vlákno kategorie G.651.1 dosahuje útlumu  $3,5\ \text{dB/km}$  při  $850\ \text{nm}$  a  $1,0\ \text{dB/km}$  při  $1300\ \text{nm}$  [11] a nabízí vyšší realizovatelné datové rychlosti pro krátké vzdálenosti než jednovidová vlákna v prostředích, kde většina spojů nepřesahuje  $100$  až  $250\ \text{m}$  [12].

**Minimální poloměr ohybu** Vzhledem k relativně malým datovým nárokům a možnosti duplexního přenosu po jediném vlákně se hlavním parametrem pro výběr vlákna stal minimální poloměr ohybu. Vlákno je vystaveno ztísněným podmínkám jak při ukládání na navíjecí bubnu, tak při odmotávání za letu, kdy může docházet k jeho dynamické deformaci.

Norma ITU-T G.657 definuje čtyři podkategorie vlákna lišící se minimálním povoleným poloměrem ohybu [13]: G.657.A1 s minimem  $10\ \text{mm}$ , G.657.A2 a G.657.B2 s minimem  $7.5\ \text{mm}$  a G.657.B3 s minimem  $5\ \text{mm}$ . Pro tuto práci bylo zvoleno vlákno **G.657.A2** s minimálním poloměrem ohybu  $7.5\ \text{mm}$ , které je plně kompatibilní s normou G.652.D a lze jej tedy kombinovat s běžně dostupnými mediakonvertory a SFP moduly [13].



Obrázek 2.4: Porovnání minimálních poloměrů ohybu pro kategorie vlákna ITU-T G.657 a závislost útlumu na poloměru ohybu. Převzato a upraveno z [14].

## 2.2 Existující řešení

### Komerční řešení

**Tethered drony** Nejrozšířenějšími komerčně dostupnými prostředky využívající fyzické spojení vzdušného prostředku se zemí jsou tzv. tethered drony – multirotorové UAV fyzicky propojené se pozemní stanicí kabelem. Ten ve většině dostupných řešení plní výhradně napájecí úlohu, která umožňuje kontinuální vzdušný monitoring bez závislosti na kapacitě palubních baterií [15]. Datová komunikace přitom nadále probíhá bezdrátově.

Přenos výkonu kabelem klade specifické požadavky na napětovou hladinu. Výkon  $P$  přenášený kabelem s odporem  $R$  způsobuje odporové ztráty  $P_{ztráty} = I^2 R$ . Protože  $I = P/U$ , při vyšším napětí klesá proud a tím i průřez potřebného vodiče a jeho hmotnost. Rodriguez et al. demonstrovali funkční tethered systém již při napětí 16 V a proudu 20 A [16], avšak při delším kabelu by takový proud vyžadoval neprakticky těžké vodiče. Komerční systémy proto přenášejí napájení typicky na hladině 400 V DC [17], kde palubní DC/DC měnič převádí napětí na hodnotu požadovanou pohonnou soustavou dronu.

Příkladem komerčního produktu je tethered stanice Elistair Safe-T 2, která je nasazena u více než 500 uživatelů včetně OSN (nasazení v záchranných operacích pro zajištění spojení) a je kompatibilní s drony DJI M400 a dalšími platformami s provozním napětím odpovídajícím 6-12 článkům lithiových baterií [18]. Palubní modul se instaluje místo baterie bez nutnosti úpravy letounu, přičemž původní řídicí systém a bezdrátová komunikace jsou zachovány beze změny. Systém nabízí jako volitelné příslušenství přenos dat po optickém vlákne integrovaném do tetheru [18], což dle Fattoriho a Cocuzzi představuje optimální řešení pro datový přenos v TUAV systémech [15].

### Vojenská řešení

**Historické nasazení – FOG-M a torpéda** Myšlenka ovládnutí zbraní prostřednictvím optického vlákna sahá do 80. let 20. století. Americká armáda vyvinula střelu FOG-M (Fiber-Optic Guided Missile), u níž kamera v nose přenášela video po odvíjejícím se optickém vlákne k operátorovi, který mohl řídit úder bez přímého vizuálního kontaktu na cíl [19]. Program byl zrušen v roce 1991, avšak jeho nástupce EFOGM byl vyvíjen až do roku 2002 [20].



Obrázek 2.5: Tethered stanice Elistair Safe-T 2 s mikro-tetherem délky 110 m a volitelným přenosem dat po optickém vlákně. Převzato z [18].

Princip optického vlákna jako datového spoje přežil v torpédech. Německé těžké torpédo DM2A4 SeaHake mod 4 (Atlas Elektronik) využívá optické vlákno pro přenos dat ze sonaru a naváděcích povelů, čímž zajišťuje odolnost vůči rušení [21]. Stejnou cestou se vydává i americké námořnictvo – systém IPLCS (Improved Post-Launch Communications System) společnosti L3Harris nahrazuje měděné vodiče u torpéda MK-48 (Mod-8) optickým vláknem, které poskytuje tisícinásobně vyšší přenosovou kapacitu a větší dosah při zachování minimálního průměru kabelu [22].



Obrázek 2.6: Střela Y MGM-157B systému EFOGM s cívku optického vlákna v ocasní části. Video z palubní kamery bylo přenášeno po odvíjejícím se vlákně k operátorovi na pozemní stanici. Převzato z [20].

**Masové nasazení na Ukrajině od roku 2024** Zásadní průlom v nasazení optického vlákna u dronů přinesla válka na Ukrajině. Intenzivní použití elektronického boje oběma stranami vedlo k tomu, že rádiově řízené FPV drony se staly v hustě rušených oblastech fronty velmi obtížně použitelnými. Rusko zahájilo bojové nasazení FPV dronů řízených optickým vlákem na jaře 2024, Ukrajina brzy poté [23].

Optické vlákno o délce typicky 10–20 km se odvíjí z cívky nesené dronem, přičemž propojení je imunní vůči veškerým prostředkům elektronického boje [24]. Drony dosahují

omezenější obratnosti jako rádiově řízené modely, přenášejí video ve vyšším rozlišení, s velmi nízkou latencí a jsou navíc pro protivníka neviditelné na radiolokátoru – nevyzařují žádný rádiový signál [24]. Na podzim 2024 zaznamenaly ruské drony s optickým vláknem zásahy cílů více než 19 km za frontovou linií [23]. Dosah těchto systémů se však rychle zvyšuje – zatímco cívky s dosahem 10–20 km byly v roce 2024 standardem, v průběhu roku 2025 se do bojového nasazení dostávají cívky s dosahem 50 km a více [25, 26]. Nejrozšířenějším ruským systémem tohoto typu se stal dron *Kníže Vandal Novgorodský* (KVN), vyvinutý vědecko-výrobním centrem Uškunik a poprvé bojově nasazený v srpnu 2024 v Kurské oblasti [24]. Celá konstrukce dronu byla přizpůsobena masové výrobě – tělo je vyrobeno z jednoho vylisovaného laminátu – a produkce tohoto systému dosahuje desítek tisíc kusů měsíčně [27]. Po modernizaci v roce 2025 byl dosah prodloužen na 50–65 km díky větším cívkám optického vlákna [27]. Souběžně s prodloužováním dosahu se vyvíjí i samotné vlákno – nejnovější provedení využívají kevlarem vyztužený potah, který výrazně snižuje riziko přetržení při manévrování v lesním nebo městském prostředí, za cenu vyšší hmotnosti kabelu [28].



Obrázek 2.7: Ukořistěný ruský FPV dron KVN (*Kníže Vandal Novgorodský*) s viditelnou cívkou optického vlákna připevněnou pod trupem. Dron byl poprvé bojově nasazen v srpnu 2024 v Kurské oblasti. Převzato z [29]

Nasazení tohoto principu u útočných dronů potvrzuje, že přenos dat po optickém vlákně je v kontextu moderního elektronického boje velmi spolehlivým řešením, které v kombinaci s prodloužením dosahu novějších modelů fakticky eliminovalo existenci relativně bezpečného týlového prostoru fronty. Masové nasazení však přináší dosud neřešené ekologické důsledky – miliony kilometrů optických vláken pokrývají pole, lesy a zástavbu v příhraničních oblastech, kde způsobují úhyn živočichů a jejich plastové krytí se postupně rozpadá na mikroplasty [30].

## 2.3 Implementace komunikace do řízení dronu

### HW a SW architektura dronů

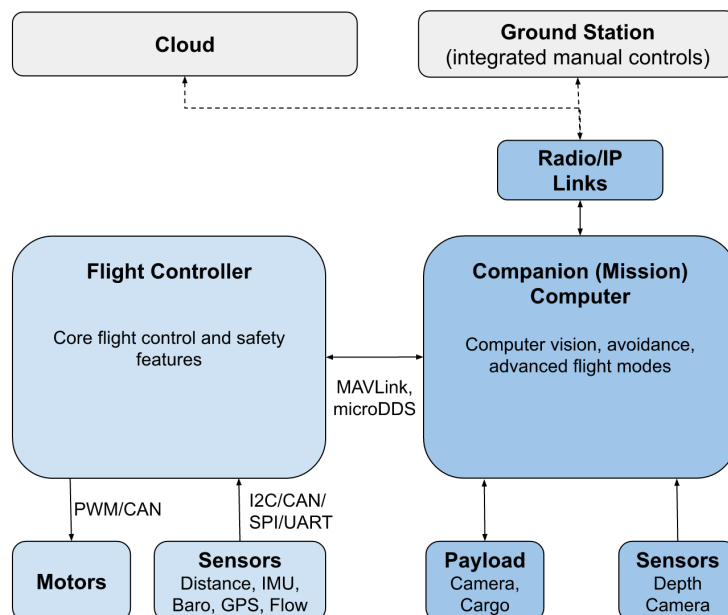
Moderní bezpilotní multirotor se z hlediska řídicí elektroniky skládá ze dvou funkčně odlišných vrstev. Základem je **flight controller** (FC) – specializovaný mikrokontrolér,

jehož primárním úkolem je stabilizace letounu v reálném čase. Zpracovává data z inerciální měřicí jednotky (IMU), barometru, magnetometru a případně GPS a s frekvencí stovek až tisíců hertzů generuje povely pro regulátory otáček motorů (ESC – Electronic Speed Controller). Tyto regulátory bývají často integrovány u kvadrokoptér do jediné desky v provedení 4v1, která řídí všechny čtyři motory současně. Kombinace flight controlleru a regulátorů na vzájemně propojených deskách se označuje jako **stack** a tvoří kompaktní řídicí jádro dronu [31]. Nejrozšířenějšími open-source firmwary pro flight controllery jsou ArduPilot a PX4, oba komunikující s okolím prostřednictvím protokolu MAVLink [31, 32].

MAVLink (Micro Air Vehicle Link) je odlehčený binární protokol navržený pro přenos telemetrie a příkazů po nespolehlivých přenosových kanálech s nízkou šířkou pásma [33]. Zprávy mají maximální délku 280 bajtů (MAVLink v2) a přenášejí stavové informace – polohu, rychlost, stav baterie, režim letu – i příkazy pro autonomní navigaci.

Pro úlohy vyžadující výraznější výpočetní výkon – zpracování obrazu, autonomní rozhodování nebo přístup k síťovým službám – se k flight controlleru připojuje **doprovodný počítač** (companion computer), zpravidla jednodeskový počítač se systémem Linux (např. Raspberry Pi, NVIDIA Jetson nebo Orange Pi). Ten komunikuje s flight controllerem přes MAVLink po sériové lince nebo Ethernetu a zároveň zajišťuje směrování telemetrie k pozemní stanici [31]. Tuto funkci jinak plní dedikované telemetrické rádio připojené přímo k flight controlleru, nebo je telemetrie přenášena zpětným kanálem RC systému – například protokol ELRS (ExpressLRS) podporuje plně obousměrný přenos MAVLink telemetrie i RC příkazů po jediném rádiovém spoji [34].

Tato dvouvrstvá architektura – flight controller pro real-time řízení, companion computer pro vyšší logiku a komunikaci – je v kontextu této práce klíčová, neboť právě companion computer bude zprostředkovávat přenos dat po optickém vlákne.



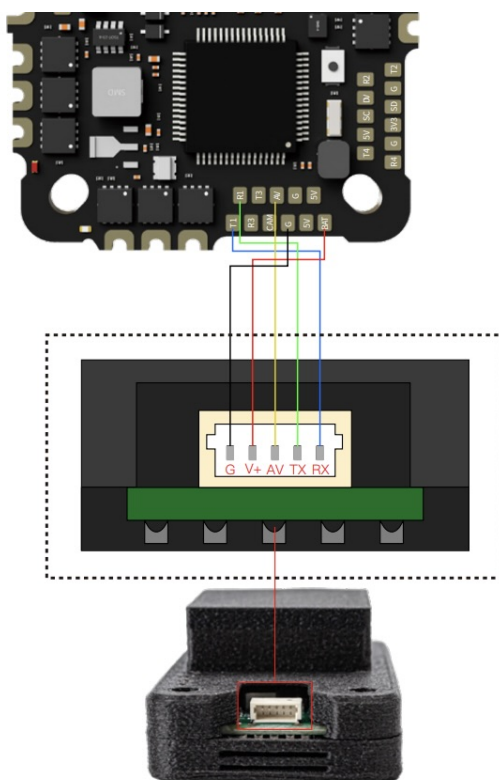
Obrázek 2.8: Architektura systému dronu s flight controllerem a doprovodným počítačem propojenými přes MAVLink. Doprovodný počítač zajišťuje vyšší logiku a směrování komunikace k pozemní stanici. Převzato z [31]

### Způsoby implementace v existujících řešeních

Technická řešení vojenských programů jako FOG-M nebo torpédo DM2A4 nejsou veřejně dostupná a jejich implementační detaily zůstávají utajeny. Vývoj civilních a polovojských modulů pro přenos dat po optickém vlákne však lze sledovat na základě komerčně dostupných produktů, jejichž vývoj výrazně urychlil konflikt na Ukrajině.

V prvních dvou letech masového nasazení (2024–2025) převažovaly moduly přenášející jeden kanál analogového videa (PAL/NTSC) a jeden kanál sériového rozhraní TTL/UART nebo SBUS pro řídicí signály, s datovou rychlostí ve stovkách kbit/s [35, 36]. Tato architektura odpovídá potřebám útočných jednosměrných dronů – přenos videa k operátorovi a zpětný kanál pro RC povely.

Typické zapojení analogového modulu ilustruje obrázek 2.9. Palubní jednotka (sky end) se připojuje k flight controlleru přes pětipinový kabel SH1.0 s signály GND, napájení, analogové video (AV), TX a RX [37]. Pozemní jednotka (ground end) analogicky poskytuje video výstup a datové rozhraní pro přijímač RC povelů. Celý systém tak tvoří přímou náhradu bezdrátového Video Transmitteru (VTX) a RC přijímače – bez jakékoli změny firmwaru flight controlleru.



Obrázek 2.9: Schéma zapojení analogového palubního modulu optického vlákna k flight controlleru. Signály AV (video), TX a RX (data) jsou přenášeny přes konektor SH1.0. Převzato z [37].

Novější generace modulů přechází na plně digitální přenos – příkladem je Pilotix Digital (80 km), který podporuje přenos videa až ve 4K rozlišení přes rozhraní HDMI, řídicí signály přes CRSF/SBUS a disponuje rovněž rozhraním RJ45 pro datové přenosy [38].

Řešení navrhované v této práci se od výše popsaných přístupů liší tím, že optické vlákno

propojuje pozemní stanici s doprovodným počítačem dronu prostřednictvím standardního Ethernetového rozhraní. Odpadá tak omezení na analogové video a jednobanální sériové rozhraní – companion computer může po vlákne přenášet plnohodnotnou IP komunikaci včetně MAVLink telemetrie, digitálního video streamu nebo vzdálené správy palubních systémů, a to obousměrně [31].

# 3 Návrh a realizace systému

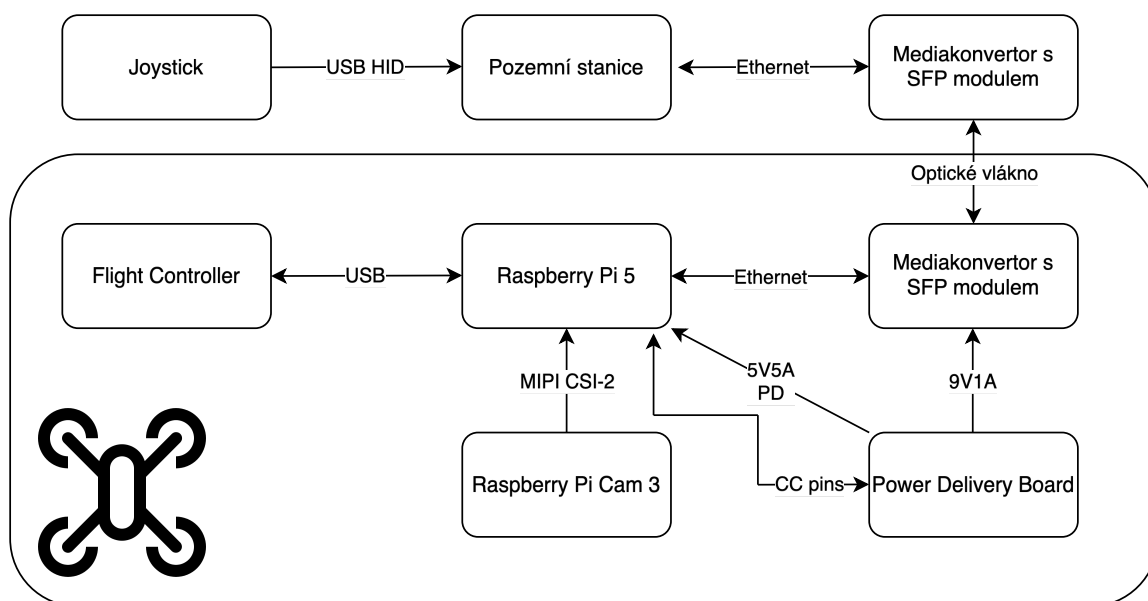
## 3.1 Návrh systému

Navrhovaný systém propojuje dron s pozemní stanicí prostřednictvím optického vlákna, přičemž vychází z dvouvrstvé architektury popsané v sekci 2.3. Klíčovým principem návrhu je oddělení real-time řídicí vrstvy od komunikační a aplikační vrstvy – flight controller zajišťuje stabilizaci letounu, zatímco doprovodný počítač (Raspberry Pi 5) zprostředkovává veškerou komunikaci se pozemní stanicí po optickém vlákne.

Optické vlákno je v systému zakončeno mediakonvertory se SFP modulem na obou stranách, čímž je přenosová trasa transparentní pro Ethernetovou komunikaci vyšších vrstev. Tato volba umožňuje využít standardní síťové protokoly bez nutnosti jakékoli modifikace softwaru na straně pozemní stanice nebo flight controlleru – veškerá specifika optického přenosu jsou skryta na fyzické vrstvě.

Pozemní stanice je tvořena libovolným počítačem vybaveným porty USB a Ethernet, který je schopen spustit software Mission Planner a GStreamer. Operátor ovládá dron joystickem RadioMaster připojeným jako USB HID zařízení a sleduje telemetrii i živý video přenos prostřednictvím těchto standardních nástrojů. Na palubě dronu zajišťuje napájení Raspberry Pi 5 i palubního mediakonvertoru vlastní napájecí deska (Power Delivery Board) napájená ze šestičlánekové baterie dronu.

Celková architektura systému je znázorněna na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Blokové schéma navrženého systému. Palubní část (uvnitř zaoblené hranice) zahrnuje flight controller, Raspberry Pi 5, kameru, mediakonvertor a napájecí desku. Pozemní část tvoří pozemní stanice s mediakonvertorem propojeným přes optické vlákno.

## 3.2 Testovací platforma

Jako testovací platforma slouží šestimotorová hexakoptéra na rámu Tarot T960 z uhlíkového vlákna Toray 3K s hmotností rámu 1050 g [39]. Dron byl původním majitelem osazen řídicím systémem DJI NAZA V2, který byl nahrazen sadou komponentů kompatibilních s firmwarem ArduPilot. Původní střídavé regulátory FOXYS Multi s trvalým maximálním proudem 40 A jsou řízeny flight controllerem MicoAir H743 V2 [40] prostřednictvím desky Matek Servo PDB BEC 2-8S, která zároveň zajišťuje rozvod napájení pro řídicí elektroniku regulátorů. Dron je dále osazen GPS modulem HGLRC M100-5883 pro provoz v prostředí s dostupným satelitním signálem.

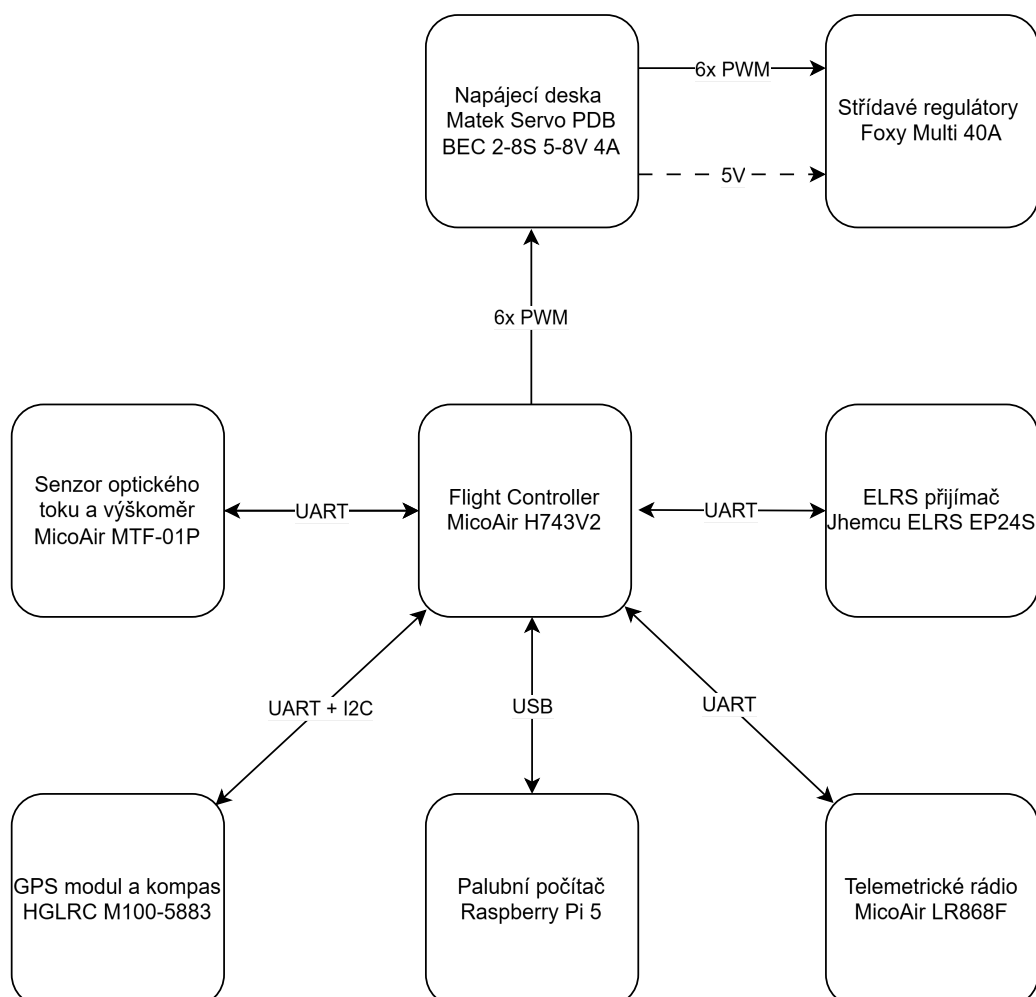
Klíčovým senzorem pro předpokládaný provoz bez GPS je jednotka optického toku a laserového výškoměru MicoAir MTF-01P [41]. Modul kombinuje kameru optického toku se senzorem VL53L5CX, který měří vzdálenost od země a poskytuje flight controlleru data pro odhad horizontální rychlosti a výšky nezávisle na satelitní navigaci. Tato schopnost je klíčová pro zamýšlené nasazení v interiérech nebo v prostředích s rušeným GPS signálem, kde by poloha dronu musela být udržována výhradně na základě palubních senzorů. Způsob integrace do estimátoru polohy ArduPilotu je popsán v sekci 3.2.1.

Výsledná sestava splňuje klíčové předpoklady pro testování navrženého komunikačního systému. Rám Tarot T960 disponuje nosností 3,5 kg [39], což poskytuje dostatečnou rezervu pro palubní elektroniku včetně Raspberry Pi 5, mediakonvertoru a napájecí desky. Vyvýšená centrální platforma rámu umožňuje vhodné umístění těchto modulů bez zásahu do aerodynamiky motorů a zároveň poskytuje vhodné podmínky pro odmotávání optického vlákna. Flight controller MicoAir H743 V2 nabízí dostatečný výpočetní výkon, nativní podporu firmwaru ArduPilot a rozhraní USB pro přímé propojení s doprovodným počítačem [40]. Celkové schéma zapojení řídicí elektroniky testovací platformy je vyobrazeno na obrázku 3.3.

Vzhledem k prakticky kompletní výměně řídicí elektroniky byla samotná testovací platforma nejprve ověřena v konvenčním provedení s RC přenosem – bez instalovaného komunikačního modulu po optickém vlákně. Tyto předběžné zátěžové lety (viz obrázek 3.2) sloužily k ověření nosnosti, stability letu a správné kalibrace nově osazených komponent. Cílem bylo izolovat případné problémy související s přestavbou rámu a elektroniky tak, aby při pozdějším testování kompletního systému s optickým vláknem byly zjištěné závady spolehlivě připsatelné pouze samotnému komunikačnímu modulu.



Obrázek 3.2: Zátěžový let testovací platformy v konvenčním provedení s RC přenosem před instalací komunikačního modulu s optickým vláknem. Pod tělem dronu je viditelná zátěž sloužící k ověření nosnosti rámu.



Obrázek 3.3: Schéma zapojení řídicí elektroniky testovací platformy. Flight controller MicoAir H743 V2 je propojen s regulátory FOXY Multi 40 A prostřednictvím desky Matek PDB, se senzorem optického toku MTF-01P, GPS modulem HGLRC M100-5883, ELRS přijímačem, telemetrickým rádiem LR868F a doprovodným počítačem Raspberry Pi 5 přes USB.

### 3.2.1 Stabilizační systémy

Odhad polohy a orientace dronu zajišťuje estimátor EKF3 (Extended Kalman Filter), užívaný v ArduPilotu jako třetí provedení interní implementace tohoto algoritmu s rozšířenou podporou přepínání zdrojů dat za běhu [42]. EKF3 fúzuje data z více senzorů současně a umožňuje přepínat mezi různými zdroji informace o poloze v závislosti na jejich dostupnosti a spolehlivosti.

Ve výchozí konfiguraci ArduPilot fúzuje rychlostní data ze všech tří sensorových sad (EK3\_SRC1, EK3\_SRC2, EK3\_SRC3) do jednoho odhadu prostřednictvím bitu *FuseAllVelocities* v parametru EK3\_SRC\_OPTIONS [42]. Toto chování je vhodné pro situace, kdy jsou všechny senzory schopny poskytovat validní data. V navrhovaném systému je však potřeba mezi sadami přepínat tak, že je v daný okamžik aktivní vždy pouze jedna – například při přechodu z venkovního prostředí s GPS do interiéru s optickým tokem. Z tohoto důvodu je fúze všech rychlostí vypnuta nastavením EK3\_SRC\_OPTIONS = 0 a přepínání mezi sadami probíhá ručně skrze GCS nebo RC kanál dle hierarchie tří provozních scénářů. Konkrétní nastavení parametrů pro jednotlivé scénáře je uvedeno v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Konfigurace zdrojů EKF3 pro jednotlivé provozní scénáře testovací platformy. Číselné hodnoty odpovídají kódům zdrojů dat v ArduPilotu: 0 = žádný, 1 = barometr / kompas, 2 = rangefinder, 3 = GPS, 5 = optický tok [42].

Parametr	Scénář 1 (GPS)	Scénář 2 (rušení)	Scénář 3 (interiér)
	EK3_SRC1	EK3_SRC2	EK3_SRC3
POSXY	3 (GPS)	0 (žádný)	0 (žádný)
VELXY	3 (GPS)	5 (Optical Flow)	5 (Optical Flow)
POSZ	1 (Baro)	1 (Baro)	2 (Rangefinder)
VELZ	3 (GPS)	0 (žádný)	0 (žádný)
YAW	1 (Compass)	1 (Compass)	1 (Compass)

**Scénář 1 – venkovní provoz s GPS** Sada EK3\_SRC1 využívá GPS modul HGLRC M100-5883 jako primární zdroj horizontální polohy a rychlosti, barometr integrovaný ve flight controlleru jako zdroj výšky a kompas pro azimut. Tento scénář poskytuje nejpreciznější odhad polohy a je výchozím režimem pro lety mimo budovy.

**Scénář 2 – venkovní provoz s rušeným GPS** Sada EK3\_SRC2 přechází na senzor optického toku MTF-01P jako zdroj horizontální rychlosti, zatímco výška je nadále odvozována z barometru. Samotný dálkoměr není doporučovaný pro užití ve venkovních podmínkách z důvodů lokálních nerovností terénu.

**Scénář 3 – vnitřní provoz** Sada EK3\_SRC3 využívá výhradně senzor optického toku MTF-01P pro horizontální rychlost a laserový výškoměr téhož modulu pro výšku nad podlahou. Barometr je v tomto scénáři vyřazen jako zdroj výšky, neboť tlakové změny v uzavřených prostorách měřené hodnoty barometrem degradují.

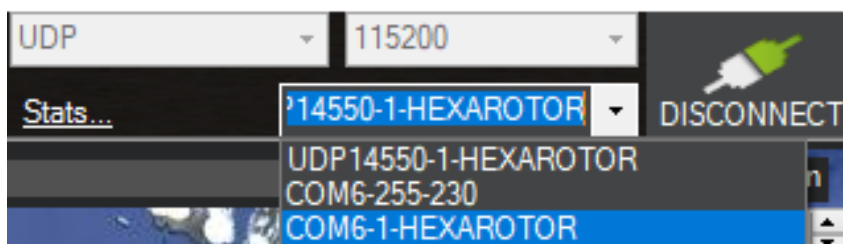
### 3.2.2 Redundantní řízení

Redundance řídicích kanálů je zajištěna dvěma nezávislými cestami – telemetrickým rádiem a přímým RC spojením.

**Primární kanál – optické vlákno** Za normálního provozu jsou veškeré příkazy operátora přenášeny po optickém vlákně. Ovladač RadioMaster (s vypnutým vysílacím modulem) je připojen jako USB HID zařízení k pozemní stanici s Mission Plannerem a povely jsou směrovány přes MAVProxy do flight controlleru.

**Záložní kanál – telemetrické rádio** Telemetrické rádio MicoAir LR868F [43] je připojeno přímo k druhému sériovému portu flight controlleru, nikoliv přes MAVProxy router běžící na Raspberry Pi. Toto zapojení je klíčové – v případě výpadku optického spojení nebo selhání Raspberry Pi by router přestal fungovat, a tím by pozemní stanice ztratila veškerou komunikaci s dronem. Přímé připojení rádia k flight controlleru zajišťuje, že záložní kanál zůstává funkční nezávisle na stavu palubního počítače.

ArduPilot nativně podporuje souběžnou MAVLink komunikaci přes více sériových portů [44]. Mission Planner na pozemní stanici je nakonfigurován se dvěma současně otevřenými spojeními – primárním přes UDP (optické vlákno) a sekundárním přes USB sériový port telemetrického rádia. Operátor může mezi těmito spojeními přepínat výběrem v horní liště Mission Planneru (viz obrázek 3.4).



Obrázek 3.4: Výběr aktivního spojení v Mission Planneru. Operátor přepíná mezi primárním kanálem (optické vlákno přes UDP) a záložním telemetrickým rádiem (sériový port).

**Nouzový RC kanál** Při zkušebních letech disponuje externí pozorovatel vlastním ovladačem RadioMaster přímo propojeným s ELRS přijímačem na palubě dronu. Tento kanál je funkční nezávisle na optickém vlákně i telemetrickém rádiu a slouží jako poslední záloha pro případ ztráty obou předchozích kanálů. Dosah RC spojení ELRS je přitom kratší než teoretický maximální dosah optického vlákna, což odpovídá předpokladu, že při letu na větší vzdálenosti bude pozorovatel dostatečně blízko.

**Failsafe hierarchie** Chování dronu při výpadku spojení je definováno dvěma nezávislými failsafe mechanismy. Při výpadku GCS spojení (výpadek optiky i telemetrického rádia současně) je dron nakonfigurován tak, aby provedl řízené přistání v aktuální poloze (Land). Důvodem této volby místo standardně používaného režimu RTL je předpoklad provozu i v interiéru nebo v prostředí s překážkami nad výškou nastavenou pro RTL – v takové situaci by automatický návrat ve výchozí výšce mohl vést ke kolizi. RC failsafe není konfigurován jako aktivní ochrana, neboť je předpokládáno, že dosah optického spoje je výrazně vyšší v jistých situacích než dosah rádiového spojení. [45].

### 3.3 Komunikační struktura

Páteří datové komunikace mezi dronem a pozemní stanicí jsou dva mediakonvertory TP-Link MC211CS-20 [5], které zajišťují transparentní převod Ethernetového signálu na optický a zpět. Jeden mediakonvertor je umístěn na palubě dronu, druhý na pozemní stanici. Oba jsou propojeny jediným jednovidovým vláknem G.657.A2 s BiDi přenosem na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm, čímž je dosaženo plně duplexního Gigabit Ethernet spojení po jediném vlákně na vzdálenost až 20 km [5]. Adresace obou stran linky je řešena statickými IP adresami, čímž odpadá závislost na DHCP serveru a spojení je funkční ihned po fyzickém spojení.

Palubní mediakonvertor byl vyjmut z původního kovového krytu za účelem snížení hmotnosti a je přímo integrován do obálky letového modulu (viz sekce 3.5.2). Na Raspberry Pi 5 běží trojice procesů zajišťujících veškerou komunikaci mezi dronem a pozemní stanicí: MAVProxy pro směřování MAVLink telemetrie, GStreamer pro enkódování videa a MediaMTX pro distribuci video streamu. Tyto procesy jsou spouštěny jediným shell skriptem využívajícím terminálový multiplexer `tmux`, který umožňuje jejich souběžný běh v oddělených oknech jediné SSH session. Operátor se tak může kdykoliv připojit ke kterémukoliv z procesů pro ladění nebo restart bez nutnosti ukončení ostatních.

Listing 3.1: Skript pro souběžné spuštění MAVProxy, GStreamer a MediaMTX na RPi 5

```
tmux new-session -d -s drone -x 220 -y 50

tmux rename-window -t drone:0 'mavproxy'
tmux send-keys -t drone:0 \
    'source ~/mavenv/bin/activate && \
    mavproxy.py --master=/dev/ttyACM0,115200 \
    --out=udp:192.168.10.1:14550' Enter

tmux new-window -t drone -n 'gstreamer'
tmux send-keys -t drone:gstreamer '<gst-launch pipeline>' Enter

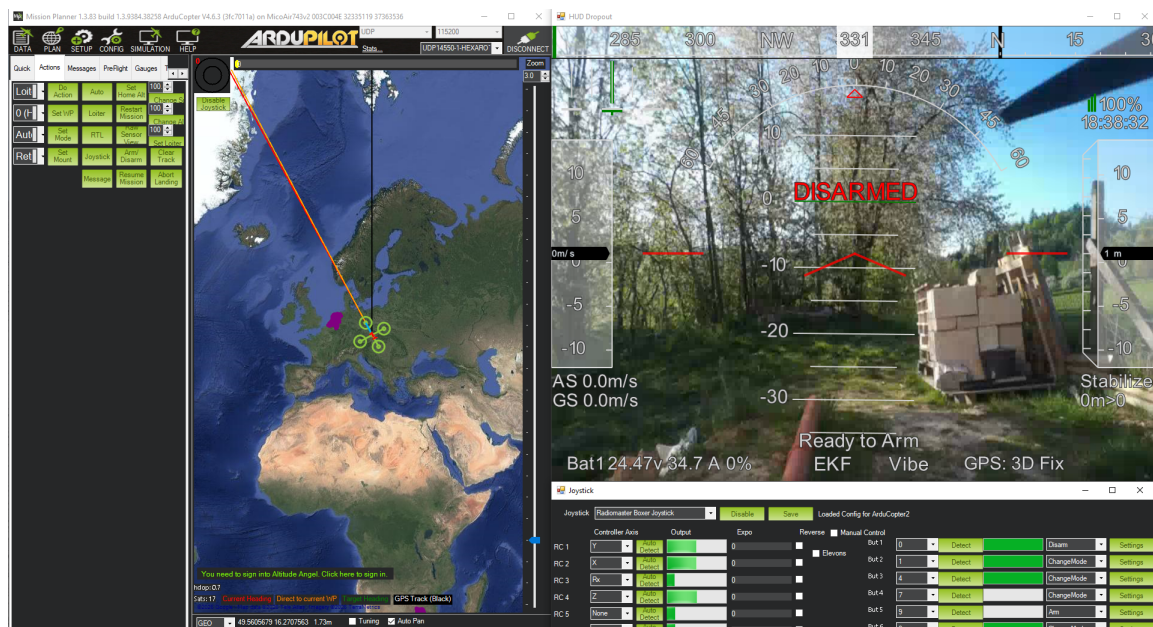
tmux new-window -t drone -n 'mediamtx'
tmux send-keys -t drone:mediamtx \
    '~/mediamtx/mediamtx ~/mediamtx/mediamtx.yml' Enter

tmux select-window -t drone:0
tmux attach -t drone
```

Klíčovou vlastností tohoto řešení oproti záložnímu telemetrickému rádiu MicoAir LR868F

je výrazně vyšší datový tok a nižší latence. Záložní rádio pracující na technologii LoRa v pásmu 868 MHz dosahuje maximální přenosové rychlosti  $3.2 \text{ kB s}^{-1}$  [43], což postačuje pro přenos MAVLink telemetrie, ale neumožňuje přenos videa a standardně ani manuální řízení s nízkým zpožděním. Ethernetové spojení přes optické vlákno naopak poskytuje přenosovou kapacitu v řádu stovek megabitů za sekundu a latenci srovnatelnou s lokální sítí. Tím je otevřena možnost současného přenosu telemetrie, živého videa a manuálního řízení joystickem po jediné fyzické trase.

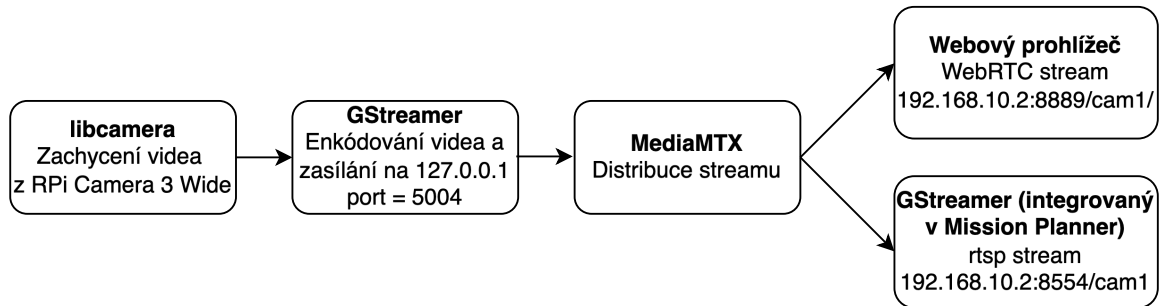
Ovládání dronu joystickem je zajištěno prostřednictvím modulu *JoystickSetup* v Mission Planneru [46], který čte vstupy z libovolného USB HID zařízení přes rozhraní DirectInput a převádí je na MAVLink zprávy `RC_CHANNELS_OVERRIDE` odesílané do flight controlleru. Ovladač RadioMaster je přepnut do režimu USB HID s vypnutým vysílacím modulem. Přestože dokumentace firmwaru EdgeTX pokročilý režim joysticku (*Advanced Joystick*) nedoporučuje [47], standardní režim neposkytoval správně rozlišitelné jednotlivé osy a tlačítka pro Mission Planner. Z tohoto důvodu byl použit pokročilý režim, ve kterém uživatel ručně přiřazuje fyzické vstupy ovladače jednotlivým HID kanálům.



Obrázek 3.5: Pracovní prostředí operátora na pozemní stanici. Vpravo živý videopřenos prolutý letovými daty, vlevo panel akcí Mission Planneru pro zaslání MAVLink příkazů, vpravo dole monitoring vstupů z joysticku RadioMaster.

### 3.3.1 Videopřenos

Videopřenos po optickém vlákne využívá stejnou Ethernetovou infrastrukturu jako MAVLink telemetrie, je však zpracováván samostatným řetězcem softwarových komponent znázorněným na obrázku 3.6. Zdrojem obrazu je kamera Raspberry Pi Camera Module 3 Wide připojená přes rozhraní MIPI CSI-2, která prostřednictvím ovladače `libcamera` poskytuje raw obrazová data frameworku `GStreamer`. `GStreamer` následně provádí zmenšení rozlišení a softwarové enkódování do formátu H.264, který je přes lokální UDP socket předán serveru `MediaMTX`. Ten zajišťuje distribuci streamu dalším klientům – buď přes `WebRTC` do webového prohlížeče, nebo přes `RTSP` do `GStreamer` pipeline integrované v Mission Planneru.



Obrázek 3.6: Schéma toku videa od palubní kamery k pozemní stanici. Obraz je zachycen ovladačem libcamera, enkódován GStreamerem a odeslán přes UDP do MediaMTX serveru, který distribuuje stream přes WebRTC nebo RTSP.

Důležitým aspektem je, že Raspberry Pi 5 – na rozdíl od předchozí generace RPi 4 – neobsahuje hardwarový H.264 enkodér [48]. Veškeré enkódování proto probíhá softwarově prostřednictvím elementu `x264enc`, což zatěžuje CPU a může v budoucnu představovat omezení pro vyšší rozlišení nebo snímkovou frekvenci. Pro zamýšlené nasazení s rozlišením  $848 \times 480$  při 60 fps je však výkon RPi 5 dostatečný.

Palubní pipeline zachytí obraz z kamery Raspberry Pi Camera Module 3 Wide [49] v rozlišení  $1536 \times 864$  (tj. nativní binning mód senzoru Sony IMX708, který má fyzické rozlišení pixelů  $4608 \times 2592$ ) při 60 fps. Následně je obraz softwarově zmenšen elementem `videoscale` na  $848 \times 480$  a předán enkodéru `x264enc`. Výsledný H.264 stream je zapouzdřen do kontejneru MPEG-TS a odeslán na lokální UDP port:

Listing 3.2: Palubní GStreamer pipeline pro enkódování a odesílání videa

```

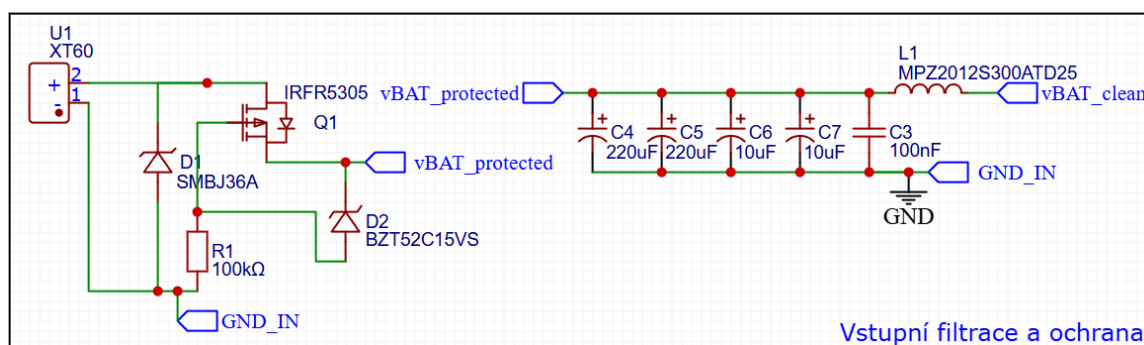
gst-launch-1.0 -v \
  libcamerasrc ! \
  video/x-raw,format=NV12,width=1536,height=864,framerate=60/1 !
  ↪ \
  videoscale ! \
  video/x-raw,width=848,height=480,format=NV12 ! \
  queue max-size-buffers=1 leaky=downstream ! \
  videoconvert ! \
  x264enc tune=zerolatency speed-preset=ultrafast bitrate=2500 \
    key-int-max=15 bframes=0 cabac=false byte-stream=true !
  ↪ \
  video/x-h264,profile=baseline ! \
  h264parse config-interval=1 ! \
  mpegtsmux ! \
  udpsink host=127.0.0.1 port=5004 sync=false async=false
  
```

Pipeline je navržena s důrazem na minimalizaci end-to-end latence. Enkodér je v režimu `tune=zerolatency` bez B-snímků a CABAC kódování, využívá nejjednodušší H.264 profil `baseline` a krátký interval klíčových snímků (`key-int-max=15`). Před enkodérem je zařazena `leaky queue` s kapacitou jediného snímku, která při přetížení zahazuje starší snímky namísto akumulace zpoždění, a výstupní `udpsink` má vypnutou synchronizaci s hodinami pipeline. Tato opatření odrážejí kompromis preferující nízkou latenci před kompresním poměrem – vzhledem k dostatečné přenosové kapacitě optického vlákna není snížený kompresní poměr problémem.

### 3.4 Napájení systému

Napájení palubní elektroniky představuje specifickou výzvu v prostředí dronu. Střídavé regulátory motorů (ESC) generují na napájecí lince výrazné napěťové špičky a vysokofrekvenční rušení, které mohou destabilizovat citlivou digitální elektroniku. Z tohoto důvodu je napájení důsledně filtrováno na vstupu desky a veškeré napájecí větve jsou odděleny od vstupu z baterie až za ochranným a filtračním stupněm.

Vstup desky je dimenzován pro baterie 6S až 8S s rozsahem napětí 20 až 33,6 V a je osazen konektorem XT60. Ochranný stupeň zahrnuje ochranu proti přepólování realizovanou P-kanálovým MOSFET tranzistorem IRFR5305 řízeným přes pull-down rezistor  $R_1$ , a TVS diodou D1 SMBJ36A, která omezuje napěťové špičky na lince. Zenerova dioda D2 BZT52C15VS zajišťuje ochranu hradla tranzistoru i pro případy napájení osmičlánkovou baterií. Za ochranným stupněm následuje filtrační sekce tvořená dvojicí elektrolytických kondenzátorů  $C_4$ ,  $C_5$ , keramickými kondenzátory  $C_6$ ,  $C_7$  a blokovacím kondenzátorem  $C_3$ . Feritová tlumivka L1 odděluje chráněnou sběrnici `vBAT_protected` od vyfiltrované sběrnice `vBAT_clean`. Zemní sběrnice `GND_IN` je záměrně připojena ke společné zemi `GND` až za celou kaskádou filtračních kondenzátorů, čímž se zabrání přímému vnášení rušení ze vstupní sběrnice do citlivých obvodů desky.



Obrázek 3.7: Schéma vstupního ochranného a filtračního stupně napájecí desky. Tranzistor Q1 zajišťuje ochranu proti přepólování, transil D1 přepětovou ochranu a filtrační síť LC odděluje sběrnici `vBAT_clean`.

Deska zajišťuje dvě výstupní větve (viz obrázek 3.8). První větev využívá snižující měnič TPS54260DGQR s výstupem 9 V/1 A, jehož výstup je vyveden na konektor Barrel jack 5,5×2,1 mm pro napájení palubního mediakonvertoru. Pro požadované výstupní napětí 9 V vychází ideální hodnota  $R_H = 102.5 \text{ k}\Omega$ . Jelikož tato hodnota není dostupná v standardních řadách, je horní rezistor realizován sériovým zapojením  $102 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega = 103 \text{ k}\Omega$ , čímž je výstupní napětí záměrně nastaveno mírně nad 9 V:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \cdot \left( \frac{R_{\text{H}}}{R_{\text{D}}} + 1 \right) = 0,8 \cdot \left( \frac{103}{10} + 1 \right) = 9,04 \text{ V} \quad (3.1)$$

Tato volba zajišťuje, že výstupní napětí neklesne pod jmenovitou hodnotu 9 V ani při uvážení tolerancí součástek.

Druhá větev je realizována snižujícím měničem LM70660RRXR s nastavitelným výstupním napětím, které je určeno odporovým děličem zpětné vazby podle stejného vztahu jako u předchozího měniče (rovnice 3.1). Horní rezistor děliče  $R_{\text{H}} = R_5 = 100 \text{ k}\Omega$  je pevný, spodní část děliče tvoří kaskáda rezistorů, jejichž efektivní hodnota  $R_{\text{D}}$  je ovlivňována spínáním jednotlivých PDO výstupů USB-C PD kontroléru STUSB4710.

PDO (Power Data Object) je standardizovaná datová struktura protokolu USB Power Delivery, která identifikuje konkrétní kombinaci napětí a proudu, jež je zdroj schopen dodat připojenému zařízení [50]. Při připojení nového zařízení dojde mezi zdrojem a spoteřebičem k vyjednávání po linkách CC1 a CC2, jehož výsledkem je výběr jednoho z nabízených PDO profilů. STUSB4710 podporuje až pět nezávisle konfigurovatelných PDO profilů, přičemž PDO1 je vždy aktivní jako výchozí profil odpovídající základnímu 5 V napájení dle USB specifikace. Profily PDO2 až PDO5 jsou pak realizovány samostatnými výstupními piny kontroléru, které při aktivaci zkratují odpovídající uzel v odporovém děliči k zemi a tím zkrátí spodní větev děliče.

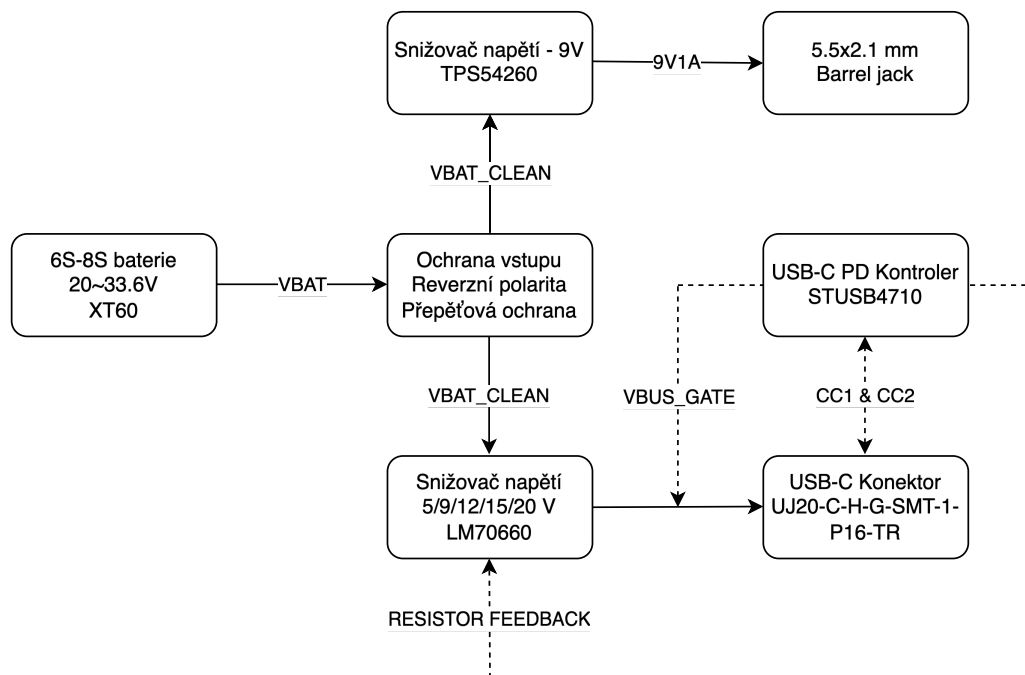
Z výroby je STUSB4710 nakonfigurován tak, že PDO1 odpovídá profilu 5 V/3 A, což je standardní USB-C výchozí profil. Raspberry Pi 5 však pro plný výkon (a neomezení proudu do periférií) požaduje 5 V/5 A, a proto bylo nutné NVM paměť kontroléru reprogramovat. K tomu byl použit oficiální vývojový software ST STSW-STUSB001 [51] ve spojení s vývojovou deskou NUCLEO-F072RB, která zajišťuje I<sup>2</sup>C komunikaci s kontrolérem během programování.

Vypočítané hodnoty pro jednotlivé PDO profily jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2: Přepínání výstupního napětí LM70660 pomocí PDO profilů USB-C PD kontroléru STUSB4710.

Aktivní PDO	$R_{\text{D}}$ [k $\Omega$ ]	$V_{\text{out}}$ [V]
PDO1 (výchozí)	18,87	5,04
PDO2	9,67	9,07
PDO3	7,17	11,96
PDO4	5,67	14,91
PDO5	4,17	19,99

Optimalizace desky je zaměřena na profil 5 V/5 A odpovídající napájení Raspberry Pi 5 – při tomto profilu prochází deskou nejvyšší proud a DPS byla dimenzována právě pro tento provozní bod. Ostatní profily slouží jako rezerva pro případné budoucí rozšíření o zařízení vyžadující vyšší napájecí napětí.



Obrázek 3.8: Blokové schéma napájecí desky (Power Delivery Board). Silové cesty jsou znázorněny plnou čarou, řídicí signály přerušovanou čarou.

## 3.5 Mechanické řešení

Vedle softwarového a elektrotechnického řešení bylo nutné vyřešit také mechanickou integraci celého systému na dron. Tato část se zabývá dvěma klíčovými aspekty – přípravou optického vlákna včetně výroby koncovek a samotného návinnu, a návrhem obálky pro uchycení palubní elektroniky na rám dronu. Důraz byl kladen na minimalizaci hmotnosti, vyrobiteľnost dílu pomocí FDM 3D tisku a modulární uchycení umožňující snadnou výměnu cívký s vláknem.

### 3.5.1 Příprava optického vlákna

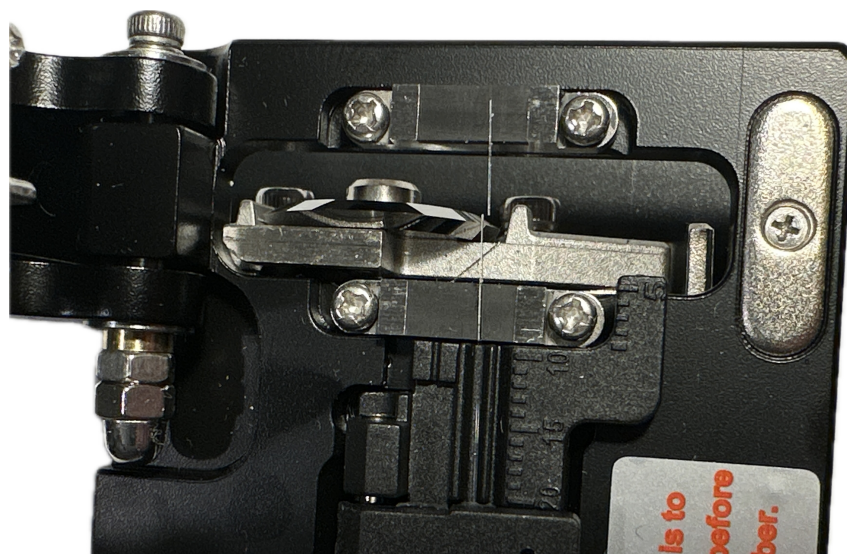
#### Příprava koncovek

Jak bylo popsáno v sekci 2.1, kvalita optického spoje závisí na precizním zakončení vlákna, které musí mít rovnou a kolmou lomovou plochu bez jakýchkoliv nečistot. Jakékoliv znečištění nebo nerovnost lomu se projeví výrazným zvýšením útlumu spoje, případně úplnou ztrátou signálu.

Postup přípravy koncovky zahrnuje tři hlavní kroky. V prvním kroku je z vlákna odstraněn ochranný plastový plášť tlustý 0.3 mm, čímž se obnaží samotné jádro s pláštěm (cladding) o průměru zhruba 125  $\mu\text{m}$ . Tato operace vyžaduje precizní holicí kleště, které odstraní plast bez poškození skelného vlákna.

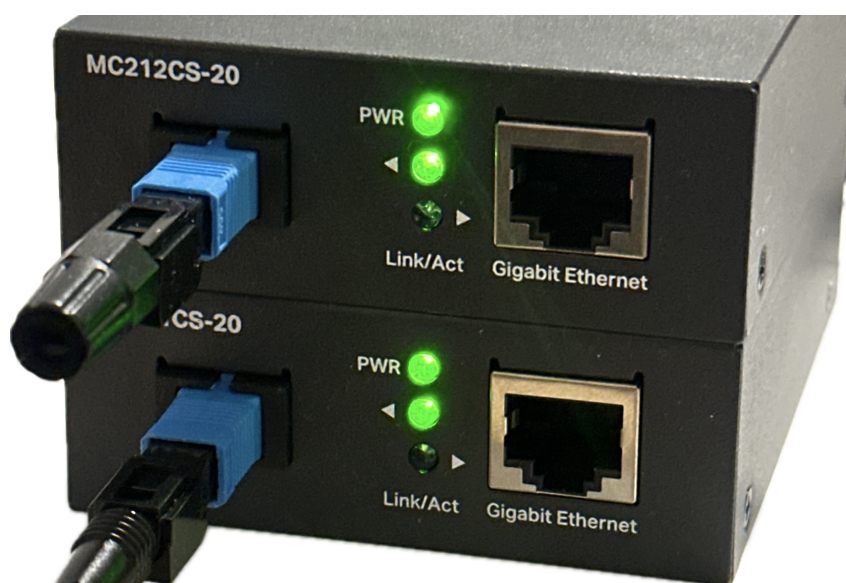
Druhým a nejkritičtějším krokem je přesné zalomení vlákna pomocí specializované lámačky (viz obrázek 3.9). Lámačka nejprve zajistí fixaci vlákna přivřením do držáku a následně řízeným tahem způsobí jeho rozlomení v přesně kolmé rovině k ose vlákna. Takto vytvořená plocha má minimální útlum při spojení s konektorem.

Ve třetím kroku je připravené vlákno zasunuto do mechanického konektoru typu SC/UPC, který zajišťuje jeho přesné axiální vyrovnání a fixaci. Tento přístup nevyžá-



Obrázek 3.9: Specializovaná lámačka optického vlákna použitá při přípravě koncovek. Na snímku je zacyhčen stav po zalomení vlákna.

duje tepelné svařování vláken a umožňuje přípravu konektorů i bez větších nákladů na specializované vybavení.



Obrázek 3.10: Dvojice mediakonvertorů TP-Link MC211CS-20 s aktivním spojením.

Ověření funkčnosti připravené koncovky probíhalo přímým zapojením do mediakonvertoru TP-Link MC211CS-20. Úspěšné navázání spojení bylo indikováno rozsvícením Link LED diody na čelním panelu mediakonvertoru (viz obrázek 3.10). Teprve při aktivní signalizaci byla koncovka považována za validní. Tento postup byl iterativně vylepšován do stavu, kdy byla úspěšnost přípravy koncovek dostatečně vysoká pro praktické použití.

### Návin vlákna

Samotné navíjení vlákna se prokázalo jako relativně náročný proces pro zhotovení v domácích podmínkách. V prvních iteracích bylo zjištěno, že navzdory dimenzování cívky

s poloměrem 15 mm – tedy přibližně na dvojnásobek minimálního ohybového poloměru vlákna G.657.A2 uvedeného v sekci 2.1.2 – vznikla při několika stech otáčkách kumulace za normálních podmínek zcela zanedbatelných ztrát, a výsledný spoj tak nebyl použitelný. Zpětná kontrola technického listu vlákna potvrdila, že ačkoliv je útlum na jednom ohybu o poloměru blízkém minimu specifikace zanedbatelný (řádově tisíce dB), při několika stech opakování se tyto dílčí ztráty sčítají do hodnot výrazně ovlivňujících kvalitu spoje [14]. Po zvětšení poloměru cívky na 18 mm se v dalších iteracích tento problém dále nevyskytoval.

Poslední výzvou bylo dosažení dostatečně napnutého návínu (z důvodu bezproblémového odvíjení z letícího dronu) při současné prevenci vzniku mikroskopických poškození vlákna, která bylo možné odhalit až při finálním ověření integrity spoje postupem popsaným v sekci 3.5.1. Napnutost vlákna byla navíc negativně ovlivněna rozjezdy velké dodavatelské cívky, která po překonání suchého tření akcelerovala nad rychlost navíjení malé cívky a musela být tedy ručně přibrždována. Délka navinutého vlákna byla počítána z otáček velké cívky, u níž lze velmi přesně předpokládat, že průměr odvíjeného vlákna zůstává takřka konstantní při návinech v řádu stovek metrů.



Obrázek 3.11: Navíjecí sestava sestávající z velké dodavatelské cívky (vlevo) osazené v ložiscích, dřevěné konstrukce s ložiskovým domkem a přechodky pro upnutí cílové cívky do aku-vrtačky.

Pro navíjecí proces byla navržena a vyrobena sada ložiskových domků a přechodek pro upnutí cívky do aku-vrtačky, která sloužila jako pohon. Celé uspořádání navíjecí stanice je zobrazeno na obrázku 3.11. Výsledný návín s rovnoměrným rozložením vlákna po celé délce cívky je zobrazen na obrázku 3.12.



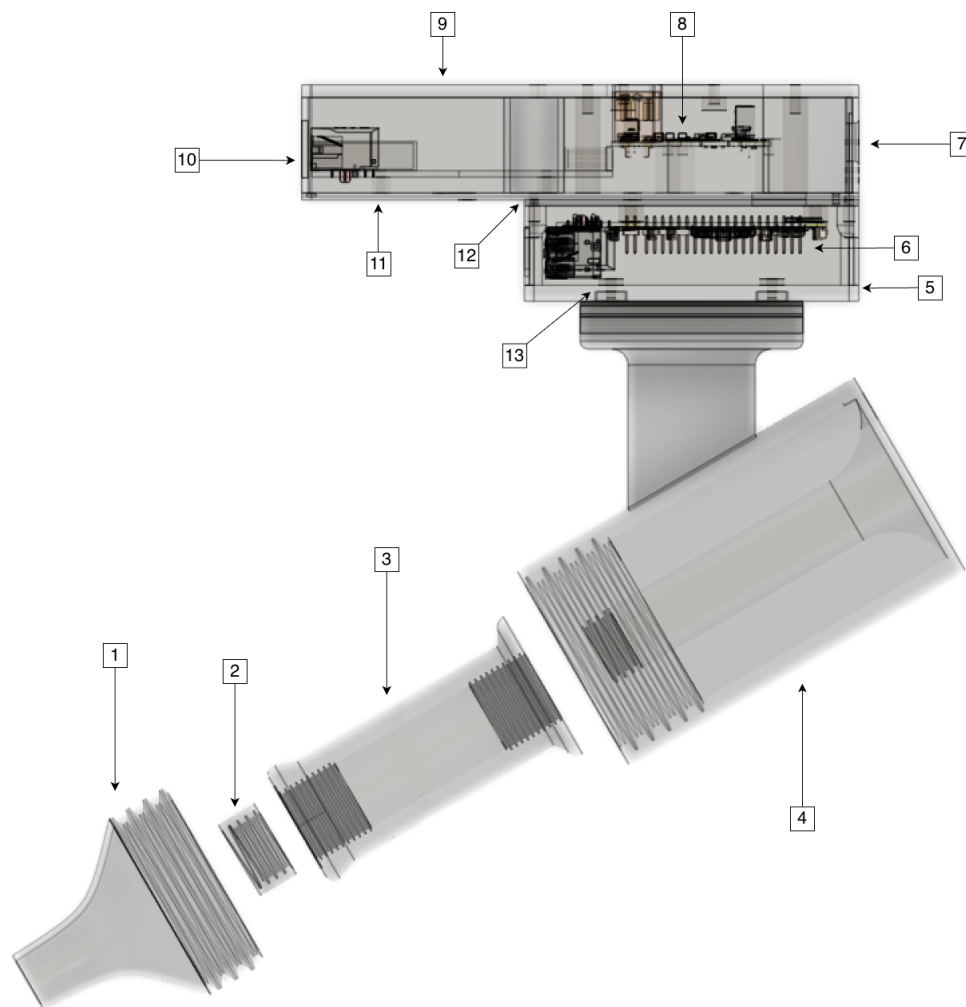
Obrázek 3.12: Výsledný návin optického vlákna na cívce. Rovnoměrně rozložený a napnutý návin zajišťuje plynulé odvíjení během letu.

Výsledný proces byl i přes svoji časovou náročnost optimalizován a dosahoval dobrých výsledků jak z hlediska funkčnosti spoje, tak plynulosti odvíjení. Z finančních důvodů a vzhledem k předchozím neúspěšným pokusům byly finální ukázky omezeny na vyšší desítky metrů vlákna.

### 3.5.2 Obálka návinu vlákna a komponent

Primárními úkoly při návrhu obálky celého systému byla minimalizace rozměrů a zároveň zachování co nejefektivnější možnosti výroby součástek pomocí FDM tisku. Toho bylo dosaženo pomocí řady spojek vzájemně spojených šrouby M3 do závitových vložek, které byly za tepla nalisovány do připravených otvorů. Ačkoliv se veškerou silovou kabeláž napájení podařilo vést uvnitř obálky, Ethernetová propojka mezi palubním počítačem a mediakonvertorem je vedena vnějškem. Stejně tak USB propojení mezi palubním počítačem a flight controllerem vede vnějškem, neboť při případném nasazení na jiné platformě by byla dispozice připojení odlišná.

Samotný zásobník optického vlákna je k hlavnímu tělu připevněn mechanickou spojkou, která umožňuje snadnou výměnu v případě potřeby návinu většího množství vlákna. Cívka připravená postupem popsáním v sekci 3.5.1 je v zásobníku dotažena zátkou a pro efektivnější odvíjení je vlákno směřováno skrze chrlič. Při tvorbě CAD sestavy byl využit veřejně dostupný STEP model Raspberry Pi 5 [52]. Celkové uspořádání obálky včetně jednotlivých komponent je zobrazeno na obrázku 3.13.



Obrázek 3.13: Boční pohled na sestavu obálky s popisy jednotlivých komponent.

Tabulka 3.3: Legenda komponent obálky dle obrázku 3.13.

Pozice	Popis	Pozice	Popis
1	Chrlič vlákna	8	Power Delivery Board
2	Upevňovací zátka	9	Spojka s dronem
3	Cívka s návinem vlákna	10	Mediakonvertor
4	Zásobník vlákna	11	Obálka mediakonvertoru a PDB
5	Kryt Raspberry Pi	12	Mezikus s RPi
6	Raspberry Pi 5	13	Zasouvací spojka zásobníku
7	Kamera		

# 4 Testování a měření

## 4.1 Měření latence videa

Nejrelevantnějším parametrem videopřenosu pro manuální řízení dronu je end-to-end latence – tedy celkové zpoždění mezi okamžikem, kdy událost nastane v zorném poli kamery, a okamžikem, kdy je zobrazena na obrazovce operátora. Toto zpoždění zahrnuje veškeré fáze řetězce zpracování popsaného v sekci 3.3.1.

Měření bylo provedeno přímou metodou založenou na simultánním zobrazení časomíry a jejího obrazu z kamery na jedné obrazovce. V prohlížeči pozemní stanice byly otevřeny stopky zobrazující čas s přesností na milisekundy. Kamera dronu byla namířena přímo na obrazovku, takže obraz časomíry byl v souběžně zobrazeném videopřenosu opět vidět – s odstupem odpovídajícím právě end-to-end latenci řetězce. Rozdíl mezi hodnotou na přímém zobrazení časomíry a hodnotou v zachyceném videu na témže monitoru tak přímo udává latenci celého systému (viz obrázek 4.1).



Obrázek 4.1: Měření end-to-end latence videopřenosu. V levé části obrazovky je zobrazen videopřenos z palubní kamery namířené na pravou část obrazovky se spuštěnou online časomírou. Rozdíl mezi zobrazenými hodnotami představuje celkovou latenci řetězce.

Měření bylo provedeno pro čtyři konfigurace lišící se rozlišením a způsobem zobrazení na straně pozemní stanice. Pro každou konfiguraci byly pořízeny 3 vzorky a výsledné hodnoty v tabulce 4.1 představují průměry z těchto měření.

Tabulka 4.1: Naměřené průměrné hodnoty end-to-end latence videopřenosu pro testované konfigurace. Každá hodnota je průměrem ze tří měření provedených metodou popsanou v sekci 4.1.

Konfigurace	Způsob zobrazení	Průměrná latence [ms]
848p/60fps	WebRTC/Chrome	124,3
848p/60fps	GStreamer/Mission Planner	166,0
1536p/60fps	GStreamer/Mission Planner	185,3
1920p/30fps	GStreamer/Mission Planner	165,3

Výsledky ukazují, že nejnižší latence 124.3 ms bylo dosaženo při rozlišení 848p zobrazeném přes WebRTC v prohlížeči Chrome. Přenos stejného rozlišení dekodovaný GStreamerem v Mission Planneru vykazuje vyšší latenci 166.0 ms, což naznačuje, že dekodování v Mission Planneru přidává oproti nativnímu WebRTC dekodéru přibližně 40 ms. Konfigurace 1536p dosahuje nejvyšší průměrné latence 185.3 ms, zatímco 1920p při nižší snímkové frekvenci 30 fps vykazuje 165.3 ms.

Naměřené hodnoty latence je nutné posuzovat v kontextu zamýšleného způsobu ovládání. Primárním kritériem při návrhu pipeline byla latence srovnatelná s konvenčními FPV systémy, kde osobní zkušenost s rádiově řízenými drony ukazuje, že pro intuitivní manuální ovládání je nutné udržet latenci pod přibližně 100 ms. Při práci se stabilizovanými platformami – jakými jsou průzkumné nebo inspekční drony s aktivní stabilizací polohy – se však tolerovatelná latence výrazně prodlužuje. Dron v režimu Loiter aktivně udržuje polohu bez zásahu operátora, takže pilot reaguje na odchylky od požadované polohy, nikoli na okamžité výchyly letounu. V tomto kontextu jsou naměřené hodnoty latence plně přijatelné a neomezují použitelnost systému pro zamýšlené aplikace.

## 4.2 Testovací let

### 4.2.1 Legislativní aspekty

Testovací platforma představuje soukromě zhotovený dron s maximální vzletovou hmotností (MTOW) pod 25 kg, který spadá do kategorie provozu OPEN A3 dle nařízení Evropské agentury pro bezpečnost letectví (EASA) [53]. Tato kategorie omezuje provoz na oblasti mimo urbanistickou zástavbu, dostatečně vzdálené od osob nezúčastněných na provozu, a nevyžaduje speciální povolení pro každý let. Místo zkušebního letu bylo vybráno v souladu s těmito požadavky – v zemědělsky využívané krajině mimo obytnou zónu.

Vzhledem ke specifické konfiguraci ovládání, kdy pilot operuje dron primárně skrze videopřenos optickým vláknem z pozemní stanice bez přímého vizuálního kontaktu s letounem, byl při zkušebním letu přítomen externí pozorovatel vybavený RC ovladačem RadioMaster propojeným přímo s ELRS přijímačem na palubě dronu (viz sekce 3.2.2). Tento pozorovatel plnil dvě funkce – udržoval přímý vizuální kontakt s dronem a v případě nestandardní situace mohl převzít manuální řízení nebo aktivovat nouzové přistání jako kill-switch.

### 4.2.2 Provedení zkušebního letu

V rámci zkušebního letu bylo v plánu otestovat následující funkcionality navrženého systému:

- Manuální ovládání dronu pilotem z pozemní stanice prostřednictvím joysticku a videopřenosu po optickém vlákně.
- Souběžné ovládání pozorovatelem přes RC ovladač s ověřením korektní funkce redundantního řízení.
- Zasílání MAVLink příkazů z pozemní stanice (Mission Planner) – například změna letového módu nebo aktivace návratu na místo startu (RTL).
- Přechody mezi letovými módy s různými konfiguracemi EKF zdrojů (sekce 3.2.1) – zejména přechod ze scénáře 1 (GPS + barometr) do scénáře 2 (optický tok + barometr) a zpět, ověřující stabilitu odhadu polohy při změně zdrojů.

- Ověření volného odvíjení optického vlákna z připraveného návínu o délce 100 m během letu, včetně sledování integrity spoje při manévrování dronu.

Konfigurace dronu připraveného na zkušební let je zobrazena na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Testovací platforma připravená ke zkušebnímu letu v kategorii OPEN A3. Pod tělem dronu je viditelný zásobník s návínem optického vlákna a chříč pro plynulé odvíjení během letu.

Průběh testování byl komplikován dvěma okolnostmi. První let skončil havárií způsobenou nevlídnými povětrnostními podmínkami, přičemž při ní došlo k poškození části testovací platformy a znehodnocení připraveného návínu vlákna. Následné lety proto musely být rozděleny do více kratších segmentů z důvodu nedostatečné délky použitelného vlákna – dostupné zásoby byly vyčerpány ztrátami při výrobě předchozích neúspěšných cívek a při havárii. Navzdory těmto omezením se podařilo ověřit všechny klíčové funkcionality systému: manuální ovládání dronu přes optické vlákno s využitím videopřenosu, volné odvíjení vlákna za letu (v rozsahu dostupné délky), letecké režimy, záložní ovládání přes RC ovladač externího pozorovatele a přepnutí řízení na záložní telemetrické rádio.

## 5 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem a realizací systému pro řízení dronu prostřednictvím optického vlákna. Cesta od první myšlenky k funkčnímu prototypu nebyla přímočará – zahrnovala hlubší ponoření do fyziky optického přenosu, studium existujících komerčních i vojenských řešení a nakonec vlastní návrh, který se od těchto řešení v klíčových aspektech liší. Rešeršní část práce poskytla teoretický základ přenosu po optickém vlákně, přehled typů vláken a hardwarových prostředků, a analýzu způsobů integrace optiky do existujících dronových systémů.

Praktická část pak přinesla kompletní realizaci – od návrhu napájecí desky přes konfiguraci GStreamer pipeline pro nízkolatenční videopřenos až po mechanickou přípravu cívek optického vlákna a 3D tištěné obálky pro palubní modul. Šlo přitom o první osobní zkušenost s tak velkou a výkonnou létající platformou, což samo o sobě přineslo cenné praktické poznatky daleko přesahující samotné téma optické komunikace.

Výsledný systém splnil všechny předpokládané funkcionality – přenos MAVLink telemetrie, živého videa a manuálního řízení po jediném optickém vlákně, které díky použitým převodníkům může teoreticky dosáhnout mnohem větších vzdáleností než stanovených 1000 m. Klíčovou předností navrženého řešení je modularita – díky zachování standardního USB a MAVLink rozhraní jej lze nasadit prakticky na libovolnou platformu s firmwarem ArduPilot, ať už se jedná o letouny UAV, pozemní prostředky UGV nebo specializované inspekční systémy.

Nejnáročnější částí se ukázala být příprava samotného optického vlákna – navíjení v domácích podmínkách bylo zdlouhavým iterativním procesem, kde drobné odchylky v napnutí nebo poloměru ohybu vedly k nefunkčnosti spoje. Hlavním negativem realizovaného systému zůstává jednosměrnost nasazení – vlákno se odvíjí za letu bez možnosti zpětného navíjení, zůstává v terénu a představuje environmentální zátěž v podobě PMMA materiálu zanechaného v přírodě.

Tato práce osobně potvrdila přesvědčení, se kterým vznikala – že optické vlákno má v dronové komunikaci reálný potenciál přesahující válečné bojiště. Pro skutečně prakticky využitelný systém by bylo nezbytné vyřešit zpětné navíjení vlákna za letu, což představuje samostatný inženýrský problém hodný například budoucí navazující práce. Paradoxně největší motivací pro jeho řešení možná bude potřeba opačná – sbírat miliony kilometrů optického vlákna zanechaného drony na ukrajinských polích. A kdo jiný by k tomu byl vhodnější než drony samotné.

# Seznam zkratek

- UAV** Unmanned Aerial Vehicle (bezpilotní letoun)
- UGV** Unmanned Ground Vehicle (bezpilotní pozemní prostředek)
- WDM** Wavelength Division Multiplexing
- BiDi** Bidirectional (obousměrný přenos)
  - SC** Subscriber Connector
  - LC** Lucent Connector
  - FC** Ferrule Connector
  - PC** Physical Contact
  - UPC** Ultra Physical Contact
  - APC** Angled Physical Contact
- VCSEL** Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
  - ITU** International Telecommunication Union
  - IEC** International Electrotechnical Commission
- POF** Plastic Optical Fiber
- GOF** Glass Optical Fiber
- PMMA** Polymethylmethakrylát
- TUAV** Tethered Unmanned Aerial Vehicle
- FOG-M** Fiber-Optic Guided Missile
- EFOGM** Enhanced Fiber-Optic Guided Missile
- IPLCS** Improved Performance Light-weight Cable System
  - FPV** First Person View
  - IMU** Inertial Measurement Unit
  - GCS** Ground Control Station (pozemní stanice)
  - PAL** Phase Alternating Line

## 5 ZÁVĚR

- NTSC** National Television System Committee
- TTL** Transistor-Transistor Logic
- UART** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
- SBUS** Serial Bus (Futaba)
- CRSF** Crossfire Protocol
- EKF** Extended Kalman Filter
- DHCP** Dynamic Host Configuration Protocol
- HID** Human Interface Device
- MIPI CSI-2** Mobile Industry Processor Interface Camera Serial Interface 2
- MPEG-TS** Moving Picture Experts Group Transport Stream
- RTSP** Real-Time Streaming Protocol
- WebRTC** Web Real-Time Communication
- CABAC** Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding
- PDB** Power Delivery Board
- NVM** Non-Volatile Memory
- MOSFET** Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
- FDM** Fused Deposition Modeling
- RTL** Return to Launch
- MTOW** Maximum Take-Off Weight
- EASA** European Union Aviation Safety Agency

# Seznam obrázků

2.1	Akceptační kužel optického vlákna . . . . .	9
2.2	Konstrukce optického konektoru SC . . . . .	11
2.3	Vrstvy jednovidového vlákna . . . . .	12
2.4	Minimální poloměry ohybu vlákna G.657 . . . . .	13
2.5	Tethered stanice Elistair Safe-T 2 . . . . .	14
2.6	Střela YMGM-157B systému EFOGM . . . . .	14
2.7	Ukořistěný ruský FPV dron KVN . . . . .	15
2.8	Architektura dronu s doprovodným počítačem . . . . .	16
2.9	Zapojení analogového modulu optického vlákna . . . . .	17
3.1	Blokové schéma navrženého systému . . . . .	19
3.2	Zátěžový let testovací platformy . . . . .	21
3.3	Schéma zapojení řídicí elektroniky . . . . .	21
3.4	Výběr aktivního spojení v Mission Planneru . . . . .	23
3.5	Pracovní prostředí operátora na pozemní stanici . . . . .	25
3.6	Schéma toku videa od palubní kamery k pozemní stanici . . . . .	26
3.7	Schéma vstupního ochranného stupně napájecí desky . . . . .	27
3.8	Blokové schéma napájecí desky . . . . .	29
3.9	Specializovaná lámačka optického vlákna . . . . .	30
3.10	Dvojice mediakonvertorů TP-Link MC211CS-20 . . . . .	30
3.11	Navíjecí sestava . . . . .	31
3.12	Výsledný návin optického vlákna na cívce . . . . .	32
3.13	Boční pohled na sestavu obálky s popisy komponent . . . . .	33
4.1	Měření latence videopřenosu . . . . .	34
4.2	Testovací let . . . . .	36

# Literatura

- [1] SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. *Fundamentals of Photonics*. 2. vyd. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2007. ISBN 978-0-471-35832-9.
- [2] USER A1. *Optic fibre numerical aperture diagram* [Wikimedia Commons]. 2007. Dostupné také z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optic\\_fibre-numerical\\_aperture\\_diagram.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optic_fibre-numerical_aperture_diagram.svg). Licence CC BY-SA 3.0 / GFDL.
- [3] ITU-T. *Recommendation G.652 (08/2024): Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. 2024. ITU-T Recommendation. International Telecommunication Union.
- [4] SFF COMMITTEE. *INF-8074i: SFP (Small Form-factor Pluggable) Transceiver Multi-Source Agreement (MSA)*. 2001. Multi-Source Agreement. Small Form Factor Committee.
- [5] TP-LINK. *MC211CS-20: Omada Gigabit WDM Media Converter* [Technický list]. 2024. Dostupné také z: <https://www.tp-link.com/cz/business-networking/accessory/mc211cs-20/>.
- [6] SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. *Fundamentals of Photonics*. 3. vyd. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. ISBN 978-1-119-50687-4.
- [7] VCELINK. *Fiber Optic Connector Types* [VCELink Blog]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.vcelink.com/blogs/focus/fiber-connector-types>. [cit. 2026].
- [8] VINCENT. *PC vs UPC vs APC Connector: Selecting the Right Fiber Connector Type* [FS.com Blog]. 2024. Dostupné také z: <https://www.fs.com/blog/pc-vs-upc-vs-apc-connector-selecting-the-right-fiber-connector-type-1453.html>. [cit. 2026].
- [9] PASCHOTTA, R. *Modes* [RP Photonics Encyclopedia]. RP Photonics AG, 2021 [cit. 2026-04-01]. Dostupné z DOI: 10.61835/tiz. Available online at <https://www.rp-photonics.com/modes.html>.

- [10] WIKIMEDIA COMMONS CONTRIBUTORS. *Singlemode fibre structure* [Wikimedia Commons]. 2007. Dostupné také z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Singlemode\\_fibre\\_structure.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Singlemode_fibre_structure.svg). Licence CC BY-SA 3.0.
- [11] ITU-T. *Recommendation G.651.1 (11/2018): Characteristics of a 50/125  $\mu\text{m}$  multimode graded index optical fibre cable for the optical access network*. 2018. ITU-T Recommendation. International Telecommunication Union.
- [12] FS.COM. *Understanding ITU-T Standards for Various Optical Fibers* [FS.com Blog]. 2023. Dostupné také z: <https://www.fs.com/blog/understanding-itu-t-standards-for-various-optical-fibers-3255.html>. [cit. 2026].
- [13] ITU-T. *Recommendation G.657: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*. 2016. ITU-T Recommendation. International Telecommunication Union.
- [14] ITU-T. *G.657 Fibres: Bend-insensitive single-mode fibres for access networks and customer premises* [ITU-T promotional leaflet]. 2013. Dostupné také z: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/oth/0b/04/t0b040000542c01pdf.e.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/0b/04/t0b040000542c01pdf.e.pdf).
- [15] FATTORI, Francesco; COCUZZA, Silvio. Tethered Drones: A Comprehensive Review of Technologies, Challenges, and Applications. *Drones*. 2025, roč. 9, č. 6, s. 425. Dostupné z DOI: 10.3390/drones9060425.
- [16] RODRIGUEZ, Veronica; TIPANTUÑA, Christian; REINOSO, Diego; CARVAJAL-RODRIGUEZ, Jorge; EGAS ACOSTA, Carlos; PROAÑO, Pablo; HESSELBACH, Xavier. An Experimental Tethered UAV-Based Communication System with Continuous Power Supply. *Future Internet*. 2025, roč. 17, č. 7, s. 273. Dostupné z DOI: 10.3390/fi17070273.
- [17] INFINIT DRONES CORP. *DJI Matrice 400 – 110M Tethered Station* [Produktový list]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.infinitudrones.com/products/dji-m400-110m-tethered-station>. [cit. 2026].
- [18] ELISTAIR. *Safe-T 2 Tether Station* [Produktový list]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://elistair.com/solutions/tethering-station-safe-t/>. [cit. 2026].
- [19] JACOBS, Paul L. *The Fiberoptic Guided Missile (FOG-M)* [Proc. SPIE 0989, Fiber Optic Systems for Mobile Platforms II]. 1989. Dostupné z DOI: 10.1117/12.959847.

- [20] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *MGM-157 EFOGM* [Wikipedia]. [B.r.]. Dostupné také z: [https://en.wikipedia.org/wiki/MGM-157\\_EFOGM](https://en.wikipedia.org/wiki/MGM-157_EFOGM). [cit. 2026].
- [21] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *DM2A4* [Wikipedia]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://en.wikipedia.org/wiki/DM2A4>. [cit. 2026].
- [22] L3HARRIS TECHNOLOGIES. *L3Harris Fiber-Optic Cable Delivering Real-Time Torpedo Guidance to US Navy* [L3Harris Newsroom]. 2025. Dostupné také z: <https://www.l3harris.com/newsroom/editorial/2025/09/l3harris-fiber-optic-cable-delivering-real-time-torpedo-guidance-us-navy>. [cit. 2026].
- [23] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Fiber optic drone* [Wikipedia]. [B.r.]. Dostupné také z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber\\_optic\\_drone](https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_optic_drone). [cit. 2026].
- [24] CENTER FOR EUROPEAN POLICY ANALYSIS. *A New and More Deadly Drone on Russia's Battlefields* [CEPA]. 2025. Dostupné také z: <https://cepa.org/article/a-new-and-more-deadly-drone-on-russias-battlefields/>. [cit. 2026].
- [25] EUROMAIDAN PRESS. *Ukrainian drones fly 50 km on fiber optic cable* [Euromaidan Press]. 2025. Dostupné také z: <https://euromaidanpress.com/2025/12/30/ukrainian-drones-fly-50-km-on-fiber-optic-cable-no-radio-no-detection-video/>. [cit. 2026].
- [26] UKRAINE ARMS MONITOR. *Drone Warfare in Ukraine: Key Trends of 2025* [Ukraine's Arms Monitor (Substack)]. 2025. Dostupné také z: <https://ukrainesarmsmonitor.substack.com/p/drone-warfare-in-ukraine-key-trends>. [cit. 2026].
- [27] MILITARNYI. *Range of 50–65 km: Russians Modernized Fiber Optic FPV Drone Prince Vandal* [Militarnyi]. 2025. Dostupné také z: <https://militarnyi.com/en/news/range-of-50-65-km-russians-modernized-fiber-optic-fpv-drone-prince-vandal/>. [cit. 2026].
- [28] M., Povilas. *Chinese-Russian Company Have Created a More Durable Fibre Optic Cable for Military Purposes* [Technology.org]. 2025. Dostupné také z: <https://www.technology.org/2025/08/13/chinese-russian-company-have-created-a-more-durable-fibre-optic-cable-for-military-purposes/>. [cit. 2026].

- [29] EUROMAIDAN PRESS. *Ukraine scrambles to counter new Russian fiber optic drone threat* [Euromaidan Press]. 2024. Dostupné také z: <https://euromaidanpress.com/2024/10/31/ukraine-scrambles-to-counter-new-russian-fiber-optic-drone-threat/>. [cit. 2026].
- [30] MORELAND, Leon. *Plastic pollution from fibre-optic drones may threaten wildlife for years* [Conflict and Environment Observatory (CEOBS)]. 2025. Dostupné také z: <https://ceobs.org/plastic-pollution-from-fibre-optic-drones-may-threaten-wildlife-for-years/>. [cit. 2026].
- [31] PX4 DEVELOPMENT TEAM. *Companion Computers* [PX4 User and Developer Guide]. [B.r.]. Dostupné také z: [https://docs.px4.io/main/en/companion\\_computer/](https://docs.px4.io/main/en/companion_computer/). [cit. 2026].
- [32] ARDUPILOT DEVELOPMENT TEAM. *Companion Computers* [ArduPilot Documentation]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://ardupilot.org/dev/docs/companion-computers.html>. [cit. 2026].
- [33] MAVLINK PROJECT. *MAVLink Developer Guide* [MAVLink Documentation]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://mavlink.io/en/>. [cit. 2026].
- [34] EXPRESSLRS PROJECT. *MAVLink – ExpressLRS Documentation* [ExpressLRS Documentation]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.expresslrs.org/software/mavlink/>. [cit. 2026].
- [35] PRIMEDA TELECOM. *FPV Optical Fiber Module – produktové listy* [Produktové stránky]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://primeda-telecom.store/collections/video-fiber-tx-and-rx-for-drone>. [cit. 2026].
- [36] SKYWALKER TECHNOLOGY. *UAV Optical Fiber Communication Technology* [Produktové stránky]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://skywalkerfpv.com/>. [cit. 2026].
- [37] PILOTIX. *Fiber Optic Digitizing Module Manual* [HobbyDrone.cz]. [B.r.]. Dostupné také z: [https://www.hobbydrone.cz/user/related\\_files/fiber\\_optic\\_digitizing\\_module\\_manual.pdf](https://www.hobbydrone.cz/user/related_files/fiber_optic_digitizing_module_manual.pdf). [cit. 2026].

- [38] PILOTIX. *Transceiver Pilotix for Optic Fiber Module digital (80 km)* [Produktový list, HobbyDrone.cz]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.hobbydrone.cz/transceiver-pilotix-for-optic-fiber-module-digital--80km/>. [cit. 2026].
- [39] TAROT RC. *T960 CF Folding Hexacopter (TL960A)* [Produktový list]. [B.r.]. Dostupné také z: <http://tarotrc.com/Product/Detail.aspx?Lang=en&Id=f86fa22e-c589-41df-8c14-d9886f804a05>. [cit. 2026].
- [40] MICOAIR. *MicoAir H743 V2 Flight Controller* [Produktový list]. [B.r.]. Dostupné také z: [https://micoair.com/flightcontroller\\_micoair743v2/](https://micoair.com/flightcontroller_micoair743v2/). [cit. 2026].
- [41] MICOAIR. *MicoAir MTF-01P Optical Flow and Range Sensor* [Rotorama.cz]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.rotorama.cz/product/micoair-mtf-01p-optical-flow-a-range-sensor>. [cit. 2026].
- [42] ARDUPILOT DEVELOPMENT TEAM. *EKF3 Source Selection and Fallback* [ArduPilot Documentation]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-ekf-sources.html>. [cit. 2026].
- [43] MICOAIR. *MicoAir LR868F 5dBi telemetrické rádio* [Rotorama.cz]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.rotorama.cz/product/micoair-lr868f-5dbi>. [cit. 2026].
- [44] ARDUPILOT DEVELOPMENT TEAM. *Redundant Telemetry Radios* [ArduPilot Documentation]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-redundant-telemetry.html>. [cit. 2026].
- [45] ARDUPILOT DEVELOPMENT TEAM. *Failsafe Function* [ArduPilot Documentation]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://ardupilot.org/copter/docs/failsafe-landing-page.html>. [cit. 2026].
- [46] ARDUPILOT DEVELOPMENT TEAM. *Mission Planner – JoystickSetup module* [GitHub]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://github.com/ArduPilot/MissionPlanner/blob/master/Joystick/JoystickSetup.cs>. [cit. 2026].
- [47] EDGETX PROJECT. *Configure Advanced Joystick with EdgeTX* [EdgeTX User Manual]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://manual.edgetx.org/edgetx-how-to/configure-advanced-joystick-with-edgetx>. [cit. 2026].

- [48] RASPBERRY PI LTD. *BCM2712 – Raspberry Pi Documentation* [Raspberry Pi Documentation]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/processors.html>. [cit. 2026].
- [49] RASPBERRY PI LTD. *Camera Module 3* [Raspberry Pi Documentation]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-3/>. [cit. 2026].
- [50] USB IMPLEMENTERS FORUM. *Universal Serial Bus Power Delivery Specification*. 2023. Dostupné také z: <https://www.usb.org/document-library/usb-power-delivery>. [cit. 2026].
- [51] STMICROELECTRONICS. *STSW-STUSB001 – STUSB4 NVM programming software* [STMicroelectronics]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.st.com/en/embedded-software/stsw-stusb001.html>. [cit. 2026].
- [52] KINDELL, Caden. *Raspberry Pi 5 – GrabCAD Library* [GrabCAD]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://grabcad.com/library/raspberry-pi-5-2>. [cit. 2026].
- [53] EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY. *Open category – Civil drones* [EASA]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones/drones-regulatory-framework-background/open-category-civil-drones>. [cit. 2026].

# Obsah přílohy

Digitální příloha práce (ZIP archiv) obsahuje následující soubory:

- `Sestava modulu.step.zip` – CAD model palubního modulu ve formátu STEP (.step)
- `DPS.zip` – schéma a Gerber soubory napájecí desky Power Delivery Board exportované z prostředí EasyEDA
- `Skripty.zip` – spouštěcí skript `start_drone.sh` pro Raspberry Pi 5 a konfigurační soubor MediaMTX
- `Evidence_promptů.pdf` – evidence využití nástrojů generativní AI při zpracování práce