



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ZABEZPEČOVACÍ SYSTÉM VYUŽÍVAJÍCÍ OPTICKÉ SENZORICKÉ SYSTÉMY

SECURITY SYSTEM USING OPTICAL SENSING SYSTEMS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Filip Šišolák**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Dejdar, Ph.D.**

**BRNO 2024**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Filip Šišolák

**ID:** 220830

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Zabezpečovací systém využívající optické senzorické systémy

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce bude rozbor problematiky distribuované snímání pomocí optických vláken. Součástí rozboru bude popis jednotlivých metod a aktuální stav řešení problematiky optického snímání. Student provede srovnání interferometrických systémů z pohledu využitelnosti pro zabezpečení budov a provede měření s vyhodnocením zaznamenaných signálů. Diplomová práce pak bude spočívat v měření systému v reálných podmínkách. Bude obsahovat možnosti vyhodnocení narušení jednotlivých prostor a případnou eliminaci falešných alarmů. Celý senzorický systém také bude porovnán s komerčními elektronickými systémy z pohledu ceny.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 21.5.2024

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Dejdar, Ph.D.

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práca sa zaoberá problematikou distribuovaného snímania pomocou optických vlákien a jej implementáciou v rámci zabezpečovania objektov. Teoretický rozbor detailne opisuje princíp funkčnosti a možnosti využitia najpoužívanejších optických vláknových senzorov založených na báze interferometrie, difrakčných štruktúr a meraní rozptylu. Teoretická časť práce obsahuje aj prehľad aktuálneho stavu optických senzorických systémov v kontexte zabezpečovania objektov. Na vypracovanie praktickej časti je využitím teoretických poznatkov a testovacími meraniami vybraná architektúra vláknového senzoru. Opisom hardvérovej a softvérovej architektúry vyvinutého zabezpečovacieho zariadenia je priblížený spôsob jeho funkcionality. Záver praktickej časti sa zaoberá otestovaním tohto zariadenia a porovnaním s komerčnými elektronickými systémami z pohľadu ceny.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

distribuovaný optický senzor, interferometer, optické vlákno, optické vláknové senzory, vláknová mriežka, zabezpečovací systém

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the issue of distributed sensing using optical fibers and its implementation within object security. The theoretical analysis extensively describes the principles of operation and potential applications of the most commonly used optical fiber sensors based on interferometry, diffraction structures, and scattering measurements. The theoretical part also includes an overview of the current state of optical sensor systems in the context of object security. For the practical part, the architecture of the fiber sensor is selected using theoretical knowledge and testing measurements. The description of the hardware and software architecture of the developed security device outlines its functionality. The conclusion of the practical part focuses on testing this device and comparing it with commercial electronic systems in terms of cost.

## **KEYWORDS**

distributed optical sensor, fiber grating, interferometer, optical fiber, optical fiber sensors, security system

ŠIŠOLÁK, Filip. *Zabezpečovací systém využívající optické sensorické systémy*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2024. Vedúci práce: Ing. Petr Dejdar, Ph.D.

## Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko autora:** Bc. Filip Šišolák  
**VUT ID autora:** 220830  
**Typ práce:** Diplomová práca  
**Akademický rok:** 2023/24  
**Téma záverečnej práce:** Zabezpečovací systém využívající optické senzorické systémy

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Petrovi Dejdarovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Tvorba tejto práce by sa nezaobišla ani bez patričnej podpory od rodiny a blízkych, ktorým na tomto mieste patrí najväčšia vďaka.

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| Úvod   | 12        |
| <b>1 Vlákňové optické senzory</b>                | <b>13</b> |
| 1.1 Interferometrické optické vlákňové senzory   | 14        |
| 1.1.1 Fabryov–Pérotov interferometer             | 15        |
| 1.1.2 Sagnacov interferometer                    | 16        |
| 1.1.3 Machov–Zenderov interferometer             | 17        |
| 1.1.4 Michelsonov interferometer                 | 17        |
| 1.2 Senzory založené na difrakčných štruktúrach  | 18        |
| 1.2.1 Vlákňová Braggova mriežka                  | 19        |
| 1.2.2 Mriežka s dlhou periódou                   | 19        |
| 1.2.3 Naklonená vlákňová mriežka                 | 20        |
| 1.2.4 Čirpovaná vlákňová mriežka                 | 22        |
| 1.3 Distribuované optické vlákňové senzory       | 22        |
| 1.3.1 Rayleigho rozptyl                          | 23        |
| 1.3.2 Ramanov rozptyl                            | 25        |
| 1.3.3 Brillouinov rozptyl                        | 27        |
| <b>2 Aktuálny stav skúmanej problematiky</b>     | <b>29</b> |
| <b>3 Snímacia časť zabezpečovacieho systému</b>  | <b>30</b> |
| 3.1 Výber architektúry snímačej jednotky         | 30        |
| 3.2 Zapojenie a testovanie vybranej architektúry | 32        |
| 3.2.1 Použité komponenty                         | 32        |
| 3.2.2 Testovanie zapojenia MZI                   | 35        |
| 3.2.3 Testovanie zapojenia MI                    | 41        |
| 3.2.4 Záver testovania                           | 42        |
| <b>4 Návrh zabezpečovacieho systému</b>          | <b>44</b> |
| 4.1 Požiadavky na systém                         | 44        |
| 4.2 Architektúra systému                         | 44        |
| <b>5 Hardvérová architektúra</b>                 | <b>46</b> |
| 5.1 Výber platformy                              | 46        |
| 5.1.1 Raspberry Pi                               | 47        |
| 5.2 Výber AD prevodníku                          | 48        |
| 5.2.1 ADS1256                                    | 49        |
| 5.3 Doska plošného spoja                         | 49        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 5.3.1    | Návrh . . . . .                             | 50        |
| 5.3.2    | Výroba . . . . .                            | 50        |
| 5.4      | Kryt zariadenia . . . . .                   | 53        |
| <b>6</b> | <b>Softvérová architektúra</b>              | <b>55</b> |
| 6.1      | Backend . . . . .                           | 55        |
| 6.1.1    | Zber dát . . . . .                          | 56        |
| 6.1.2    | Ukladanie dát . . . . .                     | 59        |
| 6.1.3    | Vyhodnocovanie dát . . . . .                | 60        |
| 6.1.4    | Signalizáciu alarmu . . . . .               | 61        |
| 6.1.5    | Komunikačné rozhranie . . . . .             | 61        |
| 6.2      | Frontend . . . . .                          | 63        |
| 6.2.1    | Štruktúra užívateľského rozhrania . . . . . | 64        |
| 6.2.2    | Nasadenie na platformu . . . . .            | 65        |
| <b>7</b> | <b>Testovacie meranie</b>                   | <b>67</b> |
| 7.1      | Zapojenie . . . . .                         | 67        |
| 7.2      | Výber fotodetektoru . . . . .               | 68        |
| 7.3      | Nastavenie thresholdov . . . . .            | 69        |
| 7.4      | Testovací scenár 1 . . . . .                | 69        |
| 7.5      | Testovací scenár 2 . . . . .                | 71        |
| 7.6      | Testovací scenár 3 . . . . .                | 72        |
| <b>8</b> | <b>Ekonomický aspekt</b>                    | <b>75</b> |
| 8.1      | Porovnanie s komerčnými systémami . . . . . | 75        |
|          | <b>Záver</b>                                | <b>78</b> |
|          | <b>Literatúra</b>                           | <b>79</b> |
|          | <b>Zoznam symbolov a skratiek</b>           | <b>86</b> |
| <b>A</b> | <b>Obsah elektronickej prílohy</b>          | <b>89</b> |



# Zoznam obrázkov

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Rozdelenie optických vláknových senzorov z hľadiska spôsobu získania informácie z vonkajšieho prostredia [1]. . . . .  | 13 |
| 1.2  | Rozdelenie OVS na základe princípu fungovania [2, 6]. . . . .  | 14 |
| 1.3  | Architektúra vláknového Fabryho–Pérotovho interferometru [10]. . . . .   | 15 |
| 1.4  | Architektúra vláknového Sagnacovho interferometru [4]. . . . .   | 16 |
| 1.5  | Architektúra vláknového Machovho–Zenderovho interferometru [10]. . . . .   | 17 |
| 1.6  | Architektúra vláknového Michelsonovho interferometru [10]. . . . .   | 18 |
| 1.7  | Štruktúra a spektrálna odozva FBG senzoru [1]. . . . .   | 19 |
| 1.8  | Štruktúra a spektrálna odozva LPFG senzoru [1]. . . . .  | 20 |
| 1.9  | Štruktúra TFBG [20]. . . . .   | 21 |
| 1.10 | Závislosť posuvu relatívnej vlnovej dĺžky medzi rezonančnou vlnovou dĺžkou vidov plášťa a Braggovou rezonančnou vlnovou dĺžkou na teplote (vľavo) a námahe (vpravo)[22]. . . . . | 21 |
| 1.11 | Štruktúra CFBG [23]. . . . .   | 22 |
| 1.12 | Rayleigha, Brillouinova a Ramanova rozptyl vo frekvenčnom spektre [26]. . . . .  | 23 |
| 1.13 | Architektúra metódy OTDR [6]. . . . .  | 24 |
| 1.14 | Architektúra metódy OFDR [29]. . . . .   | 25 |
| 1.15 | Architektúra metódy BOTDR [29]. . . . .  | 28 |
| 1.16 | Architektúra metódy BOTDA [6]. . . . .   | 28 |
| 3.1  | Ilustrácia balančného fotodetektoru Koheron PD100B [40]. . . . .   | 33 |
| 3.2  | Ilustrácia duálneho zdroja napájania Koheron SPS200 [40]. . . . .  | 33 |
| 3.3  | Ilustrácia motýľovej laserovej diódy AeroDIODE Model 2 [41]. . . . .   | 34 |
| 3.4  | Ilustrácia ovládača laserových diód Thorlabs CLD1015 [42]. . . . .   | 34 |
| 3.5  | Bloková schéma zapojenia MZI s odizolovaým referenčným vláknom pre potreby testovania. . . . .   | 35 |
| 3.6  | Bloková schéma zapojenia MZI s kombinovaným referenčným a meracím vláknom pre potreby testovania. . . . .  | 36 |
| 3.7  | Poloha meracieho a referenčného vlákna v miestnosti SC 5.52 pri testovaní MZI s odizolovaným referenčným vláknom. . . . .  | 37 |
| 3.8  | Poloha meracieho a referenčného vlákna v miestnosti SC 5.52 pri testovaní MZI s kombinovaným referenčným a meracím vláknom. . . . .  | 37 |
| 3.9  | Výsledky merania jednotlivých zapojení MZI pri prechode osoby bez obuvi bez šliapnutia na meracie vlákno. . . . .  | 38 |
| 3.10 | Výsledky merania jednotlivých zapojení MZI pri prechode osoby bez obuvi so šliapnutím na meracie vlákno. . . . .   | 39 |
| 3.11 | Výsledky merania jednotlivých zapojení MZI pri prechode osoby s obuvou bez šliapnutia na meracie vlákno. . . . .   | 39 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.12 | Výsledky merania jednotlivých zapojení MZI pri prechode osoby s obuvou so šliapnutím na meracie vlákno. . . . .                    | 40 |
| 3.13 | Bloková schéma zapojenia MI s kombinovaným meracím a referenčným vláknom. . . . .  | 41 |
| 3.14 | Poloha meracieho a referenčného vlákna v miestnosti SC 5.52 pri testovaní MI s kombinovaným referenčným a meracím vláknom. . . . . | 42 |
| 3.15 | Časový priebeh zapojenia MI s kombinovaným meracím a referenčným vláknom. . . . .  | 43 |
| 3.16 | Spektrogram zapojenia MI s kombinovaným meracím a referenčným vláknom. . . . .   | 43 |
| 4.1  | Bloková schéma návrhu architektúry systému. . . . .  | 45 |
| 5.1  | Hardvérová architektúra zabezpečovacieho systému. . . . .  | 46 |
| 5.2  | Jednodoskový počítač Raspberry Pi 4 Model B [43]. . . . .  | 48 |
| 5.3  | Analógovo digitálny prevodník ADS1256 [46]. . . . .  | 49 |
| 5.4  | Schéma zapojenia plošného spoja. . . . .   | 51 |
| 5.5  | Návrh vedenia trás na doske plošného spoja. . . . .  | 51 |
| 5.6  | Doska plošného spoju prepojená s platformou Raspberry Pi 4. . . . .  | 52 |
| 5.7  | Model krytu zariadenia zabezpečovacieho systému. . . . .   | 53 |
| 5.8  | Výsledný hardvér zabezpečovacieho systému. . . . .   | 54 |
| 6.1  | Softvérová architektúra zabezpečovacieho systému. . . . .  | 55 |
| 6.2  | Príklad databázovej štruktúry súboru OFS.h5. . . . .   | 59 |
| 6.3  | Porovnanie komunikácie WebSocket a HTTP [62]. . . . .  | 62 |
| 6.4  | Rozbalovacie menu na navigáciu medzi oknami. . . . .   | 64 |
| 6.5  | Zobrazenie okna Dashboard. . . . .   | 65 |
| 6.6  | Zobrazenie okna SPI control panel. . . . .   | 65 |
| 6.7  | Zobrazenie okna H5 control panel. . . . .  | 66 |
| 7.1  | Bloková schéma zapojenia senzorickej jednotky. . . . .   | 67 |
| 7.2  | Ilustrácia zapojenia v miestnosti SC 5.52. . . . .   | 68 |
| 7.3  | Použitý fotodetektor. . . . .  | 69 |
| 7.4  | Ilustrácia testovacieho scenáru č. 1. . . . .  | 70 |
| 7.5  | Priebeh signálu po priamom dotyku chodidla s vláknom. . . . .  | 70 |
| 7.6  | Zobrazenie Dashboard počas priebehu testovacieho scenáru č. 1. . . . .   | 71 |
| 7.7  | Ilustrácia testovacieho scenáru č. 2. . . . .  | 72 |
| 7.8  | Zobrazenie Dashboard počas priebehu testovacieho scenáru č. 2. . . . .   | 73 |
| 7.9  | Ilustrácia testovacieho scenáru č. 3. . . . .  | 73 |
| 7.10 | Zobrazenie Dashboard počas priebehu testovacieho scenáru č. 3. . . . .   | 74 |

# Zoznam tabuliek

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.1 | Porovnanie vlastností architektúr jednotlivých typov OVS a určenie ich vhodnosti pre použitie v zabezpečovacích systémoch. . . . . | 31 |
| 5.1 | Porovnanie analógovo digitálnych prevodníkov [45, 46, 47]. . . . .   | 48 |
| 5.2 | Zoznam použitých súčiastok na vyhotovenie dosky plošného spoju [50].   | 50 |
| 6.1 | Zoznam použitých príkazov pre prácu s AD prevodníkom ADS1256 [55].   | 57 |
| 7.1 | Hodnoty thresholdov jednotlivých kanálov. . . . .  | 69 |
| 8.1 | Ceny jednotlivých komponentov. . . . .   | 75 |

# Úvod

Téma optických vláknových senzorov (OVS) sa v súčasnej dobe stáva čoraz populárnejšia aj v oblasti zabezpečovania ochrany majetku. Narastajúci trend podporuje aj cenová dostupnosť komponentov OVS a prítomnosť širokej škály výhod v porovnaní s tradičnými elektrickými systémami, čo bolo aj motiváciou pre vypracovanie diplomovej práce.

Cielom práce je preskúmať princípy fungovania rôznych typov OVS, analyzovať ich vlastnosti v kontexte zabezpečovania objektov a vyvinúť odolný viac kanálový zabezpečovací systém, ktorý by ich implementoval.

Teoretická časť práce v úvode približuje možné spôsoby získavania informácií z okolia optického vlákna a klasifikuje jednotlivé typy optických vláknových senzorov na základe princípu fungovania. Z tohto sa odvíja aj štruktúra jadra teoretickej časti, ktorá z pohľadu fyzikálneho princípu a sektoru využitia detailne popisuje jednotlivé typy interferometrických a distribuovaných vláknových senzorov a vláknových senzorov na báze difrakčných štruktúr.

Pre upevnenie správnosti nadobudnutých teoretických poznatkov obsahuje druhá kapitola prehľad aktuálneho stavu skúmanej problematiky v spektre zabezpečovania objektov voči pohybu nepovolaných osôb.

Praktická časť práce sa prvotne venuje výberu najvhodnejšieho vláknového senzorického systému pre potreby zabezpečovania objektov voči nežiadúcej aktivite. Výber sa opiera o teoretické poznatky nadobudnuté v prvej časti práce a diskutuje jednotlivé možnosti. V nasledujúcej časti prebieha testovanie vybraných vláknových senzorov a vyhodnotenie výsledkov na základe porovnania nameraných hodnôt.

Štvrtá kapitola definuje požiadavky pri návrhu zabezpečovacieho systému a pokladá základ celkovej architektúry systému pre vypracovanie praktickej časti.

V piatej kapitole je pozornosť venovaná určeniu hardvérovej architektúry a objasneniu výberu jednotlivých hardvérových komponentov. Rovnako tak kapitola obsahuje proces výroby vlastnej dosky plošného spoja a výsledného krytu zariadenia.

Šiesta kapitola pojednáva o softvérovej vrstve, v ktorej je stanovená softvérová architektúra systému logicky rozdelená do serverovej časti a časti užívateľského rozhrania. V serverovej časti je riešená problematika zberu, ukladania, vyhodnocovania dát a poskytovania ich aplikácií grafického rozhrania. V druhej časti je objasnená funkcionálnosť aplikácie užívateľského rozhrania a jeho nasadenia na platformu.

V siedmej kapitole je popísaný priebeh testovania vyvinutého zariadenia z hľadiska schopnosti detekcie chôdze osôb a odolnosti voči spúšťaniu falošných alarmov.

V závere praktickej časti je vyvinutý systém vyhodnotený a porovnaný z ekonomického hľadiska s elektrickými zabezpečovacími systémami dostupnými na trhu.

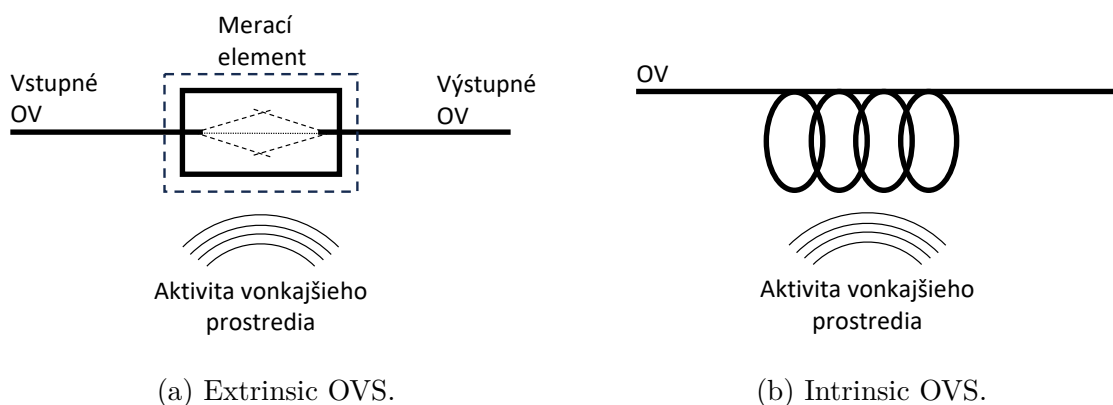
# 1 Vlákňové optické senzory

Revolúcia optoelektroniky a telekomunikácie pomocou optických vlákien mala v posledných desaťročiach zásadný vplyv na odvetvie optických vlákňových senzorov (OVS). Zdokonalovaním vlastností a zvyšovaním dostupnosti základných stavebných prvkov OVS rástla aj ich popularita v komerčných sférach. Svoje uplatnenie si našli hlavne v odvetví civilného inžinierstva pri monitorovaní zdravia stavieb, zabezpečení líniových stavieb pred nežiadúcou manipuláciou, únikom látky, prípadne monitorovaní zdravia kompozitných štruktúr v leteckom priemysle a podobne [1, 2, 3].

Optické vlákna (OV) vďaka svojim vlastnostiam, ktorými sú imunita voči elektromagnetickému rušeniu, nízky útlm, vysoká flexibilita a nízka cena, umožňujú použitie OVS v špecifických aplikáciách, kde prevládajú nad ostatnými typmi senzorov [4]. Typickou implementáciou OVS sú aplikácie, kde je meraná jedna veličina na veľkom množstve miest. V takomto prípade je jedným optickým vláknom nahradená úloha veľkého množstva bodových senzorov, čo je efektívne či už z hľadiska financií, ekológie alebo údržby [1].

Literatúra [1, 3, 5] na základe spôsobu získavania informácie z meraného signálu definuje dve základne skupiny OVS:

- Vonkajšie (angl. extrinsic) OVS, kedy je svetelný lúč vyvedený z optického vlákna do meracieho elementu, kde je ovplyvňovaný vonkajšou aktivitou ako je napr. teplota, vibrácie, látka v okolí a následne je svetelný lúč naviazaný do výstupného vlákna a privedený na detektor umožňujúci pozorovať zmeny výstupného signálu v porovnaní so vstupným.
- Vnútorne (angl. intrinsic) OVS, kde svetelný lúč nevychádza z optického vlákna a úlohu snímania zabezpečuje samotné optické vlákno [5].

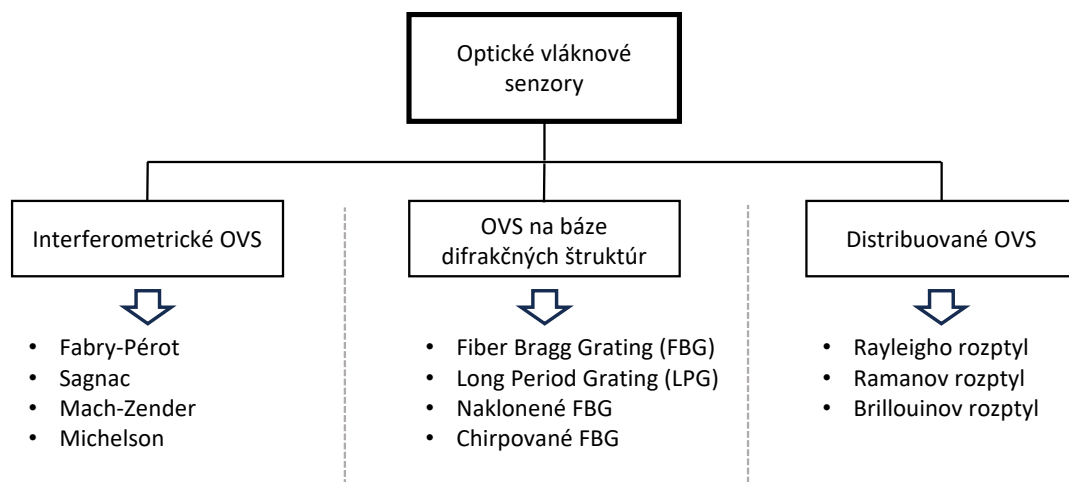


Obr. 1.1: Rozdelenie optických vlákňových senzorov z hľadiska spôsobu získavania informácie z vonkajšieho prostredia [1].

Existuje množstvo klasifikácií akými je možné rozdeliť OVS, či už z hľadiska vlastností, použitia alebo spôsobu merania. Pre účel tejto práce je najvhodnejšie rozdelenie na základe princípu fungovania ako uvádzajú Barrias a Di Sante vo svojich článkoch [2, 6].

Následujúca časť textu sa venuje jednotlivým typom OVS, viď obr. 1.2 štrukturovaných do troch základných tried:

- interferometrickým OVS,
- distribuovaným OVS (DOVS),
- senzorom založených na difrakčných mriežkach (angl. grating based).



Obr. 1.2: Rozdelenie OVS na základe princípu fungovania [2, 6].

## 1.1 Interferometrické optické vláknové senzory

Základným princípom interferometrických senzorov je vzájomná interakcia dvoch svetelných lúčov s rovnakou frekvenciou, kedy je pozorovaná fázová zmena po zviazaní lúčov [2, 4]. V zmysle architektúry všetky vláknové interferometre pozostávajú z rovnakých základných funkčných blokov:

- zdroja žiarenia,
- deliča,
- detektora žiarenia [7].

Výber konkrétneho typu je na zvážení konštruktéra, ktorý musí brať do úvahy základné parametre ako je citlivosť, cena vyhotovenia a dizajn sensorického systému [8].

Existuje mnoho typov interferometrov, ktoré nie je možné všetky obsiahnuť v tomto texte, preto v nasledujúcich podkapitolách je venovaná pozornosť štyrom najpoužívanejším vláknovým interferometrom slúžiacich na snímanie fyzikálnych veličín.

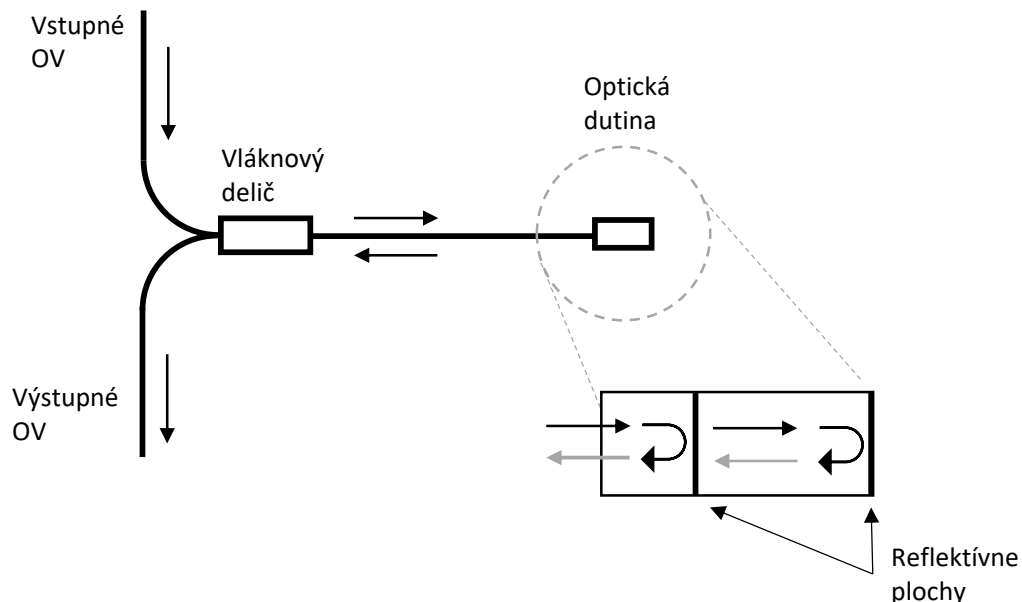
### 1.1.1 Fabryov–Pérotov interferometer

Princíp Fabryho–Pérotovho interferometru (FPI) je odlišný od ostatných typov. Architektúra FPI pozostáva z jedného ramena, na ktorom je v určitom bode vytvorená optická dutina obsahujúca dve paralelné odrazové plochy v nominálnej vzdialenosti. Po privedení svetla do ramena tvoreného konvenčným optickým vláknom je na prvej reflektívnej ploche odrazená časť žiarenia smerom naspäť na delič. Neodrazené svetlo putuje dutinou na druhú reflektívnu plochu, ktorou je následne odrazené smerom na výstup interferometru. Odrazené svetelné lúče následne v optickom vlákne interferujú a vytvárajú interferometrické obrazce, ktoré sú závislé na vzdialenosti zrkadiel. Vzdialenosť zrkadiel v optickej dutine môže byť ovplyvnená vonkajšou aktivitou ako napr. teplota okolia, tlak pôsobiaci na optickú dutinu a podobne [4, 9]. Následnú zmenu fázy vyjadruje vzťah

$$\delta_{\text{FP}} = \frac{4\pi nL}{\lambda}, \quad (1.1)$$

kde  $n$  je index lomu materiálu dutiny,  $L$  je fyzická dĺžka dutiny a  $\lambda$  je vlnová dĺžka žiarenia [4].

Na základe existencie optickej dutiny ako prostriedku na meranie je možné zhodnotiť, že vláknový FPI je určený skôr na bodové meranie. Výhodou pri vonkajších (angl. extrinsic) FPI je použitie nízko koherentného zdroja žiarenia, napr. LED. Z hľadiska konštrukcie FPI je nutné brať do úvahy komplexnosť návrhu optickej dutiny, ktorá vyžaduje určitú presnosť [1].



Obr. 1.3: Architektúra vláknového Fabryho–Pérotovho interferometru [10].

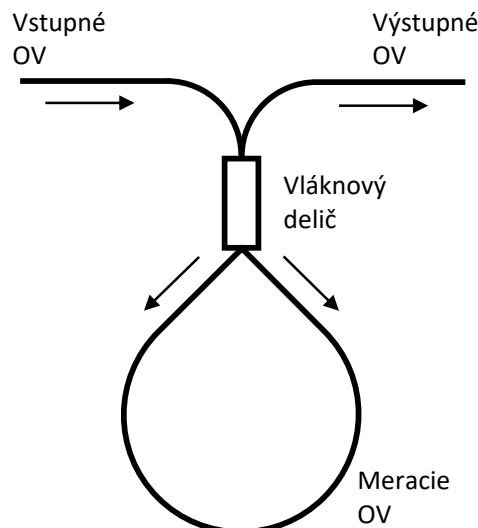
## 1.1.2 Sagnacov interferometer

Myšlienka Sagnacovho interferometru (SI) spočíva v nasmerovaní svetelného lúča do jednej uzavretej slučky pomocou optického deliča. Optický delič rozdelí zväzok na dva samostatné lúče šíriace sa v slučke v protichodnom smere. Pri plošnej rotácii celého interferometru nastáva fyzikálny jav, že svetlo, ktoré sa šíri v smere rotácie musí absolvovať dlhšiu dráhu, keďže sa mu optický delič vzdaluje. Naopak lúč, ktorý sa šíri v proti smere rotácie dorazí na optický delič po kratšej dráhe. Rozdiel prekonaných vzdialeností sa odzrkadľuje v interferenčných obrazcoch spôsobených rozdielom fáz signálov [4, 10, 11]. Výslednú fázu procesu interferencie Sagnacovho interferometru opisuje rovnica

$$\delta_{\text{SI}} = \frac{2\pi}{\lambda}BL, \quad (1.2)$$

kde  $B$  predstavuje dvojlomný (angl. birefringent) koeficient vlákna,  $L$  je dĺžka meracieho vlákna a  $\lambda$  je vlnová dĺžka žiarenia [4].

Aj keď je SI v prvom rade zamýšľaný na meranie rotácie, v prípade použitia optického vlákna miesto zrkadiel je možné hovoriť o vláknovom SI, ktorý svojimi vlastnosťami umožňuje merať navyše teplotu a vibrácie. Pre svoju jednoduchú konštrukciu bez použitia pohyblivých častí, jednoduché vyhotovenie, odolnosť a nízku konštrukčnú cenu si našiel uplatnenie hlavne v odvetviach dopravy. Vláknový SI je základom moderných vláknových optických gyroskopov využívaných pri navigácii dopravných prostriedkov. Pri voľbe vhodných komponentov a konfigurácie je možné dosiahnuť priaznivých výsledkov aj pri meraní rotačných vibrácií, akustických vibrácií a teploty [1, 4, 10, 11].



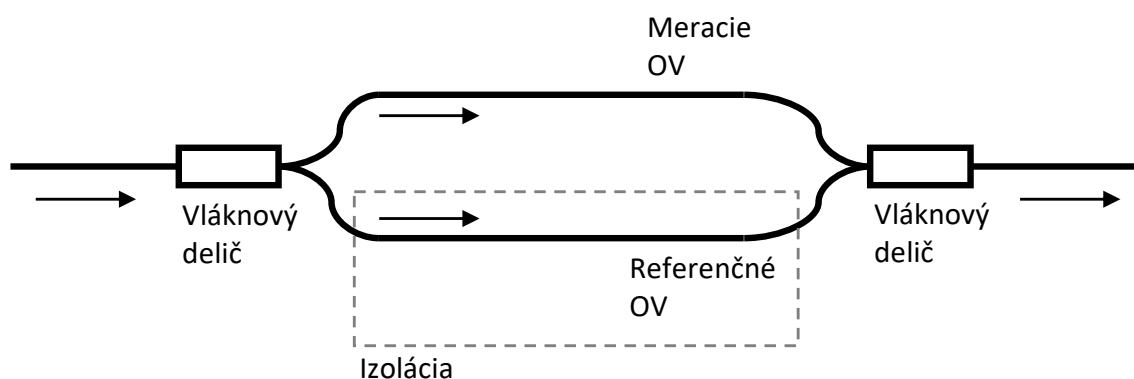
Obr. 1.4: Architektúra vláknového Sagnacovho interferometru [4].



### 1.1.3 Machov–Zenderov interferometer

Vláknový Machov–Zenderov inteferometer (MZI) využíva pre svoju funkciu dve optické vlákna pripojené oboma koncami do vláknových deličov ako zobrazuje obr. 1.5. Tento delič zabezpečuje prijatie vysoko koherentného lúča zo zdroja žiarenia, ktoré následne distribuuje do dvoch nezávislých vlákien. Optické vlákno, ktoré je odizolované od meraného prostredia sa nazýva referenčné a je žiadúce maximalizovať separáciu vlákna od meraného prostredia. Naopak meracie vlákno je vystavené vplyvu prostredia, čo zapríčiňuje zmenu jeho dĺžky prip. indexu lomu, ktorá sa prejavuje v zmene fázy svetelného lúča. Po zviazaní svetelných lúčov sú zmeny prostredia odzrkadlené v interferometrických obrazcoch, ktoré sú snímané pomocou fotodetektora a prevádzané na elektrický signál [4, 10].

Jedným zo zásadných problémov MZI je relatívna dĺžka jednotlivých ramien interferometru, ktorých rozdiel by mal byť čo najmenší na zabezpečenie správnych výsledkov merania. Na optimalizáciu tejto dĺžky sa využívajú piezoelektrické vláknové rozťahovače, ktorými je možné doceliť požadovaných hodnôt. Citlivosť a výkonnostné parametre MZI závisia taktiež od kvality použitých komponentov a ich vlastností, ktorými sú napr. koherentnosť žiarenia laseru, použitý typ OV a podobne [1, 4].



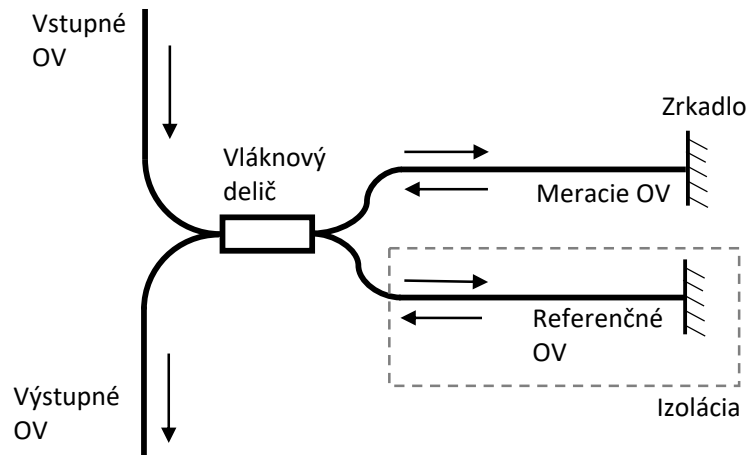
Obr. 1.5: Architektúra vláknového Machovho–Zenderovho interferometru [10].

### 1.1.4 Michelsonov interferometer

Literatúra [1, 4] konštrukčne opisuje Michelsonov interferometer (MI) ako polovičný MZI. Ako možno vidieť na obr. 1.6 MI narozdiel od MZI využíva len jeden vláknový delič a reflektívne zrkadlá na koncoch optických vlákien, tvoriace jednotlivé ramená. Princíp oboch typov interferometrov je v podstate rovnaký a ako aj MZI, vid obr. 1.1.3 využíva meracie a odizolované referenčné rameno s rozdielom, že svetlo prechádzajúce optickými vláknami je na ich konci odrazené pomocou vláknových

reflektorov naspäť do deliča. Následne je na deliči interferenciou signálov možné pozorovať aktivitu na meracom ramene.

Keďže je žiarenie na konci vlákien odrazené, dvojnásobná vzdialenosť zapríčiňuje väčšiu citlivosť ako MZI. Na vytvorenie odrazu sa najčastejšie používajú vláknové Faradayove zrkadlá, ktoré navyše spôsobujú zmenu polarizácie o  $90^\circ$ , čím minimalizujú interferenciu pôvodného a odrazeného svetelného lúča. Pri zostavovaní vláknového MI je nutné zvoliť správny typ vlákna, materiál ochrany vlákna a jeho dĺžku tak, aby bola kompatibilná s koherentnou dĺžkou zdroja žiarenia [1, 10, 12, 13, 14].



Obr. 1.6: Architektúra vláknového Michelsonovho interferometru [10].

## 1.2 Sensory založené na difrakčných štruktúrach

Špeciálnym typom vnútorných optických vláknových sensorov sú sensory založené na báze difrakčných štruktúr. Pomocou technológie vystavenia optického vlákna intenzívnemu interferenčnému UV obrazu alebo difrakčnou fázovou maskovacou metódou je docielené vytvorenie periodickej štruktúry nazývanej mriežka v optickom vlákne. Princíp senzoru je založený na prechode a rozptyle svetelného zväzku cez mriežku, kedy časť žiarenia s vlnovou dĺžkou definovanou rezonančnou frekvenciou mriežky je odrazená smerom k detektoru alebo naviazaná do plášťových vidov. Pôsobením vonkajších vplyvov je možné ovplyvniť parametre mriežky, ktoré sa odzrkadľujú na vlnovej dĺžke detekovaného žiarenia [15, 16].

Vláknové sensory založené na mriežkach sú výhodné z hľadiska ceny vyhotovenia, kompaktnosti, odolnosti voči elektromagnetickému rušeniu a ich možnosti merania vo viacerých bodoch pomocou vlnového multiplexu [1]. V nasledujúcich podkapitolách sú objasnené najznámejšie typy týchto sensorov.

### 1.2.1 Vlákňová Braggova mriežka

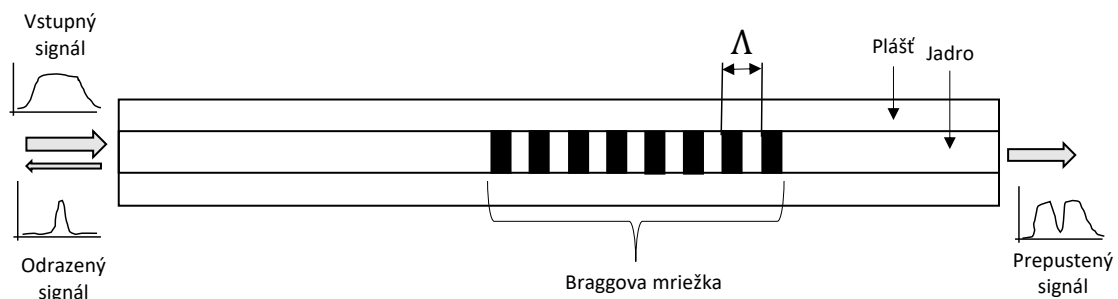
Základným typom senzorov založených na difrakčných štruktúrach sú senzory využívajúce Braggove mriežky (angl. Fiber Bragg Grating – FBG). Braggovu mriežku možno opísať ako periodicky meniaci sa index lomu jadra vlákna na vyselektovanom úseku optického vlákna. Prechodom širokospektrálneho žiarenia štruktúrou nastáva odraz na každom rozhraní zmeny index lomu. Takto odrazené vlny spolu interferujú, kedy na základe princípu konštruktívnej interferencie vznikajú len vlny s vlnovou dĺžkou  $\lambda_{bragg}$ , nazývanej aj Braggova rezonančná vlnová dĺžka. Braggovu rezonančnú vlnovú dĺžku, kde odraz dosahuje maxima a prenos minima je možné definovať podľa vzťahu

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1.3)$$

kde  $n_{eff}$  označuje efektívny vidový index a  $\Lambda$  určuje periódu mriežky [1, 17, 18].

Z rovnice (1.3) vyplýva, že zmenou parametrov  $n_{eff}$  a  $\Lambda$  vieme ovplyvniť Braggovu vlnovú dĺžku. Tento fakt je základom optických senzorov založených na difrakčných štruktúrach, keďže priamou aktivitou na vlákno ako napr. zmenou teploty alebo tlakom je možné dynamicky meniť periódu mriežky [1, 15].

Typicky sú FBG senzory používané najmä na meranie okolitej teploty a námahy v štruktúrach, lebo posun Braggovej rezonančnej vlnovej dĺžky vykazuje lineárnu závislosť k zmene teploty, príp. námahy mriežky v prakticky použiteľných rozsahoch [1].



Obr. 1.7: Štruktúra a spektrálna odozva FBG senzoru [1].

### 1.2.2 Mriežka s dlhou periódou

V prípade mriežok s dlhou periódou (angl. Long Period Fiber Grating – LPFG) platí, že perióda mriežky  $\Lambda_{LPG} > \Lambda_{FBG}$ . Ďalším zásadným rozdielom oproti FBG je využitie spolu šíriaceho sa plášťového vidu, do ktorého je naväzovaná energia šíriaca sa jadrovým vidom, čo je zapríčinené zmenou efektívneho indexu jadra. Nakoľko je energia naväzovaná do plášťového vidu, LPFG senzory nevyužívajú na meranie

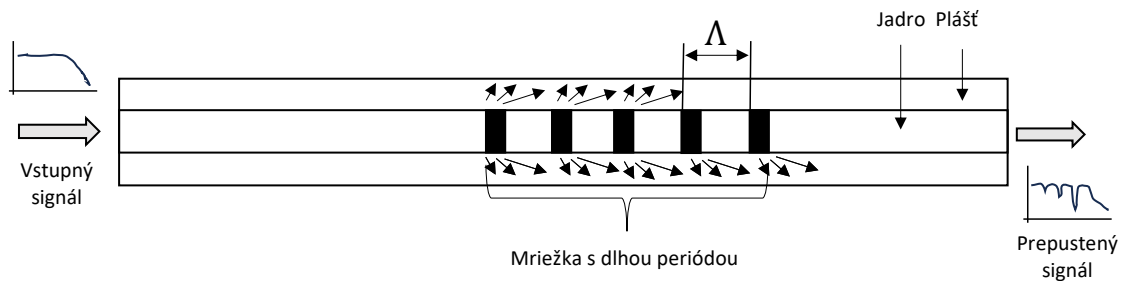
odrazený signál ale prenesený signál, ktorý je ochudobnený o určité zložky spektra [1, 18, 19].

Eftimov vo svojej publikácii [18] uvádza vzťah (1.4) na výpočet rezonančnej vlnovej dĺžky LPFG senzorov

$$\lambda_{\text{LPFG}} = \Delta n \Lambda = (n_{\text{eff}}^{\text{j}} - n_{\text{eff}}^{\text{pl}}) \Lambda, \quad (1.4)$$

kde  $n_{\text{eff}}^{\text{j}}$  je efektívny vidový index jadra,  $n_{\text{eff}}^{\text{pl}}$  značí efektívny vidový index plášťa a  $\Lambda$  určuje periódu mriežky.

LPFG senzory sa využívajú na meranie teploty, námahy a navyše umožňujú merať aj index lomu vonkajšieho prostredia [19]. Zhang v knihe [1] uvádza, že priemerná citlivosť LPFG senzorov na teplotu je v porovnaní s FBG senzormi vyššia a je silne závislá na type vlákna a parametroch mriežky. Pri zvolení vhodnej konfigurácie umožňuje dosiahnuť až desaťnásobne väčšiu teplotnú citlivosť.



Obr. 1.8: Štruktúra a spektrálna odozva LPFG senzoru [1].

### 1.2.3 Naklonená vláknová mriežka

Naklonené vláknové mriežky (angl. Tilted Fiber Bragg Grating – TFBG) sú konštrukčne veľmi podobné klasickým FBG mriežkam s jednou zásadnou zmenou. TFBG využíva naklonenie mriežkových štruktúr o uhol  $\xi$ , čím je docielený komplexnejší odraz spolu s naväzovaním do plášťových vidov. Vyslaný širokospektrálny zväzok signálu sa pri dopade na štruktúru mriežky v pomere určenom uhlom  $\xi$  rozdelí na

- odrazený signál vedený jadrovým vidom vlákna ku zdroju,
- signál naviazaný do plášťových vidov,
- signál prenesený cez mriežku [20].

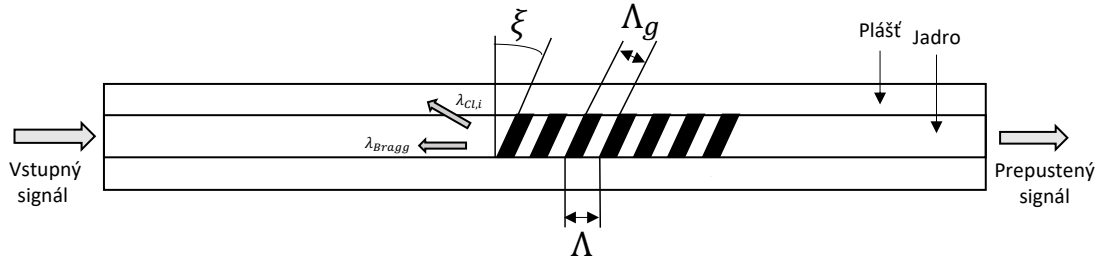
Konštrukciu TFBG a spektrum preneseného signálu je možné vidieť na obrázku 1.9 a 1.10. Zložky signálov, ktoré sú subtrahované z preneseného signálu dôsledkom mriežky, je možné opísať rovnicami (1.5) a (1.6)

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}^{\text{cl}} \frac{\Lambda}{\cos \xi}, \quad (1.5)$$

kde  $\lambda_{\text{Bragg}}$  vyjadruje rezonančnú vlnovú dĺžku vedenú vidom jadra späť ku zdroju,  $n_{\text{eff}}^{\text{Cl}}$  vyjadruje efektívny vidový index,  $\Lambda$  je perióda mriežky a  $\xi$  definuje uhol naklonenia mriežky voči osi vlákna. Rovnica (1.6) opisuje rezonančnú vlnovú dĺžku vidu plášťa následovne:

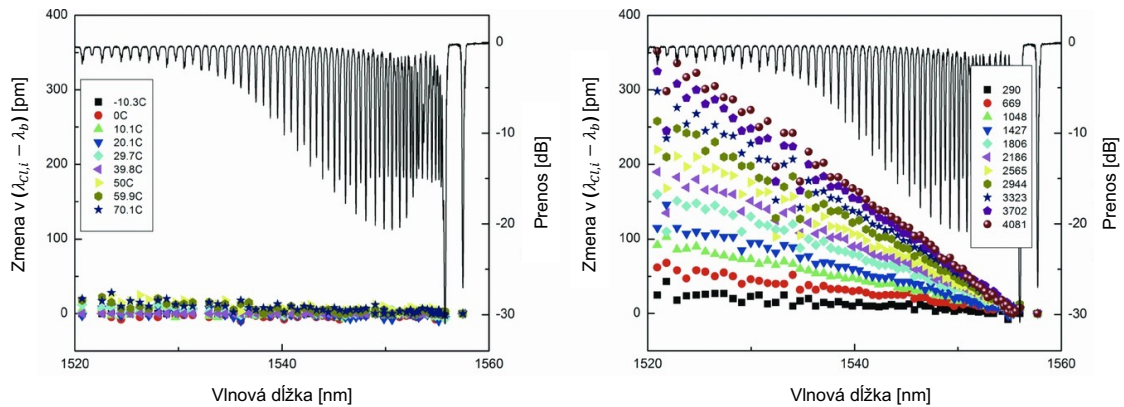
$$\lambda_{\text{Cl},i} = (n_{\text{eff}}^{\text{Co}} + n_{\text{eff},i}^{\text{Cl}}) \frac{\Lambda}{\cos \xi}, \quad (1.6)$$

kde  $n_{\text{eff}}^{\text{Co}}$  je efektívny vidový index jadra vlákna,  $n_{\text{eff},i}^{\text{Cl}}$  je efektívny vidový index  $i$  vidu,  $\Lambda$  je perióda mriežky a  $\xi$  je uhol naklonenia mriežky voči osi optického vlákna [20, 21].



Obr. 1.9: Štruktúra TFBG [20].

Dhong a Albert v publikáciach [20, 21] opisujú klasické TFBG, vďaka ich unikátnej charakteristike, ktorou je minimálna citlivosť na zmeny teploty, ako ideálne senzorské jednotky na meranie vibrácií alebo ohybov. Táto vlastnosť je zobrazená grafmi v obr. 1.10, ktoré sú výsledkom merania Chena a Alberta [22]. Rovnako tak je možné TFBG použiť na meranie prítomnosti látok, ktoré spôsobujú zmenu indexu lomu v okolí plášťa vlákna.



Obr. 1.10: Závislosť posuvu relatívnej vlnovej dĺžky medzi rezonančnou vlnovou dĺžkou vidov plášťa a Braggovou rezonančnou vlnovou dĺžkou na teplote (vľavo) a námahe (vpravo)[22].

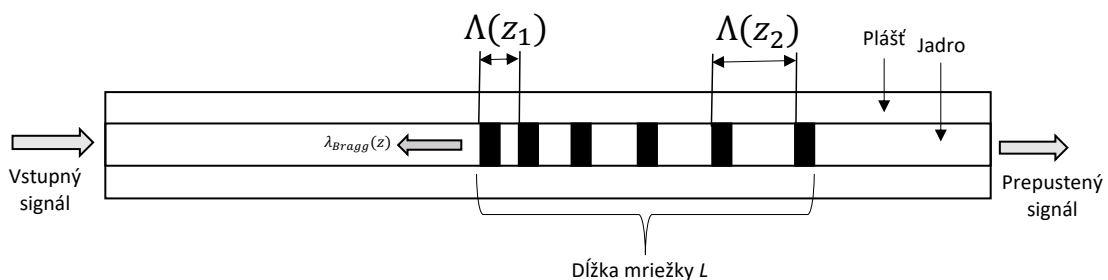
## 1.2.4 Čirpovaná vláknová mriežka

Všetky vyššie spomenuté typy mriežok sú navrhnuté s konštantnou dĺžkou periódy mriežky. Čirpované vláknové mriežky (angl. Chirped Fiber Bragg Grating – CFBG) sú naopak charakterizované meniacou sa dĺžkou periódy mriežky, vid' obrázok 1.11. Postupne meniac sa perióda mriežky zapríčiňuje variabilitu Braggovej rezonančnej frekvencie  $\lambda_{\text{Bragg}}$  na jednotlivých úsekoch mriežky, čím je spektrum odrazeného signálu širšie ako v prípade klasických FBG [23, 24]. Z hľadiska premenlivosti periódy je nutné na výpočet braggovej vlnovej dĺžky použiť funkciu. Pre lineárne CFBG, kde perióda mriežky lineárne narastá, je možné použiť rovnicu

$$\lambda_B(z) = 2n_{\text{eff}}\Lambda(z), \text{ kde platí } 0 \leq z \leq L. \quad (1.7)$$

V rovnici (1.7) označuje  $n_{\text{eff}}$  efektívny vidový index jadra,  $\Lambda(z)$  je perióda mriežky vo vzdialenosti  $z$  od počiatku mriežky a  $L$  definuje celkovú dĺžku mriežky [25].

Kľúčovou charakteristikou CFBG je skutočnosť, že odrazené spektrum signálu nezávisí len na teplote a námahe aplikovanej na celú dĺžku CFBG. Zmeny v spektre je možné detekovať aj pri pôsobení teploty, príp. námahy na jednotlivé sekcie mriežky [23], čo sa v praxi využíva predovšetkým na snímanie parametrov tekutín, teplotných hot-spotov, príp. na detekciu micro ohybov v rámci štruktúry o veľkosti mriežok [25].



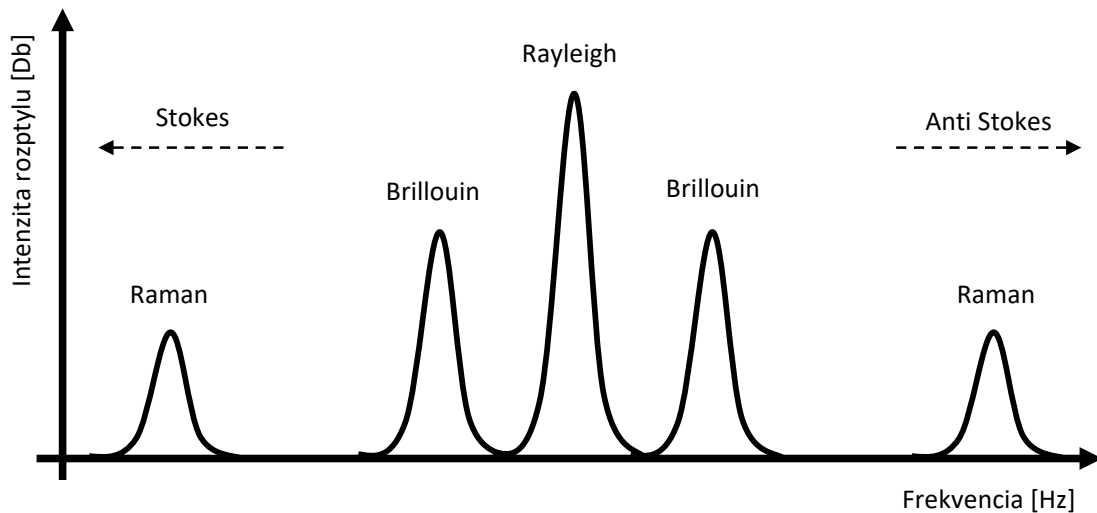
Obr. 1.11: Štruktúra CFBG [23].

## 1.3 Distribuované optické vláknové senzory

Distribuované optické vláknové senzory (DOVS) umožňujú svojimi vlastnosťami merať zmeny fyzikálnych veličín pôsobiacich po celej dĺžke optického vlákna v plne distribuovanom spôsobe. Princíp DOVS je založený na rozptyle žiarenia prechádzajúceho materiálom optického vlnovodu. Z dôvodu nehomogenity materiálu optického vlákna, príp. aktivitou iných fyzikálnych fenoménov je pri rozptyle žiarenie rozptýlené aj v smere naspäť ku zdroju [6]. Na základe tohto faktu je možné na počiatku vlákna pozorovať tri typy rozptylov, vid' obrázok 1.12 a to:

- Ramanov rozptyl,
- Rayleigho rozptyl,
- Brillouinov rozptyl [6, 26].

Nasledujúce kapitoly budú obsahovať detailnejší rozbor jednotlivých typov rozptylov a ich využiteľnosti v meraní pomocou DOVS.



Obr. 1.12: Rayleigho, Brillouinov a Ramanov rozptyl vo frekvenčnom spektre [26].

### 1.3.1 Rayleigho rozptyl

Rayleigho rozptyl je založený na zmenách indexu lomu v štruktúre jadra optického vlákna, ktoré sú prítomné v dôsledku nehomogenity hustoty a zloženia materiálu optického vlákna. Nehomogenitné častice, ktoré sú spravidla menšie ako vlnová dĺžka šíriaceho sa svetelného žiarenia, zapríčiňujú rozptyl nazývaný ako Rayleigho rozptyl. Matematicky je výkon rozptýleného svetla na detektore  $P_s(t)$  definovaný ako

$$P_s(t) = P_0 R(z) e^{-\int_0^z 2\alpha(z) dz}, \quad (1.8)$$

kde  $P_0$  je konštanta stanovená výkonom vstupného pulzu laseru a rozdeľovacieho pomeru vláknového deliča,  $z = tc/2n$  definuje pozíciu injektovaného pulzu v čase  $t$ , kde  $c$  je rýchlosť svetla vo vákuu a  $n$  je index lomu optického vlákna.  $R(z)$  je efektívny rozptylový koeficient a  $\alpha(z)$  je útlmový koeficient [1].

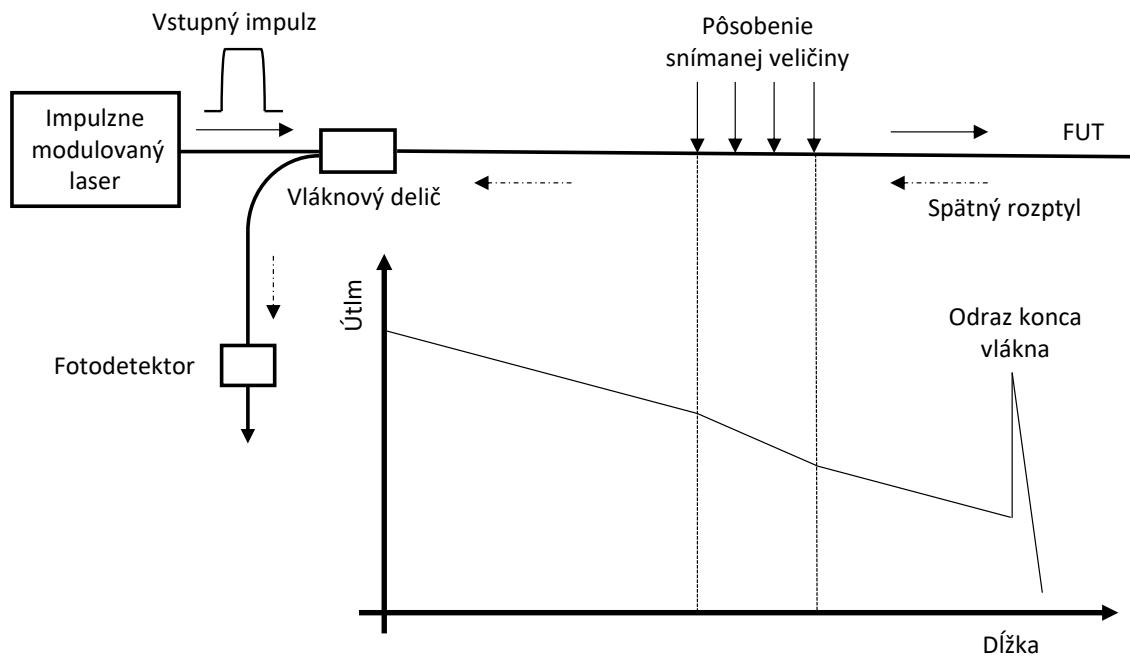
Tento typ rozptylu sa používa prevažne na meranie javov, ktoré nastávajú postupným šírením elektromagnetického žiarenia optickým vláknom ako napr. útlm, zisk, fázová interferencia a zmeny polarizácie [6].

## OTDR založené na Rayleigho rozptyle

Distribúované snímanie pomocou Rayleigho rozptylu je založené na monitorovaní časti svetla rozptýleného v smere naspäť ku zdroju. Ako reakciu na vyslaný pulz žiarenia je možné na fotodetektoroch snímať intenzitu rozptýleného žiarenia, kde zmeny rozptylových koeficientov alebo útlmu variujú v závislosti na lokálnom stave vlákna. Snímaná rozptylová intenzita je funkcia času, z čoho vyplýva aj názov meracej techniky Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) [1].

Metóda poskytuje možnosť identifikácie miesta pôsobenia meranej veličiny a tlmenia spôsobeného touto veličinou. Metóda OTDR nachádza uplatnenie najmä v testovaní kvality optických spojov telekomunikačných trás alebo vo vláknových senzorických systémoch na detekciu úniku kvapaliny príp. snímanie prítomnosti osôb v objektoch, atď. [27]

Ako môžeme vidieť na obr. 1.13, základná architektúra zostavy na meranie spätného rozptylu pozostáva zo zdroja žiarenia, ktorého výstup je na dosiahnutie tvaru impulzu modulovaný pomocou generátora impulzov. Prostredníctvom väzobného členu je signál naviazaný do meraného optického vlákna (angl. Fiber Under Test - FUT), v ktorom nastáva spätný rozptyl. Takto odrazený signál je privedený väzobným členom k detektoru žiarenia, kde je následne signálovým procesorom ďalej spracovávaný [26, 27].



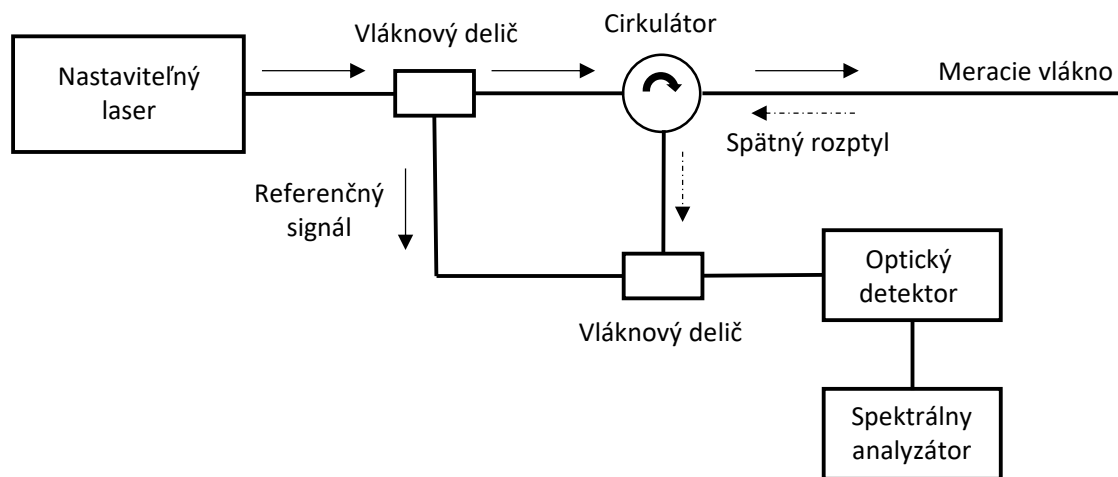
Obr. 1.13: Architektúra metódy OTDR [6].



## OFDR založené na Rayleigho rozptyle

Optická reflektometria vo frekvenčnej oblasti (angl. Optical Frequency Domain Reflectometry – OFDR) ponúka výhodu použitia metódy spätného rozptylu aj na krátke vzdialenosti, kde by systém OTDR vyžadoval extrémne rýchlu odozvu použitých komponentov [27]. Floris v článku [28] popisuje merací rozsah v porovnaní s metódou OTDR znateľne nižší so vzdialenosťou FUT od 10 m do 35 m.

Princíp metódy OFDR je založený na rozdelení vstupného laserového žiarenia frekvenčne modulovaného generátorom pílovitých kmitov do referenčného a FUT vlákna. Následne je odrazená časť žiarenia zmiešaná so svetlom z referenčného vlákna pomocou väzobného členu a privedená na vstup fotodetektoru. Zapojenie je z dôvodu práce vo frekvenčnom kontexte rozšírené o spektrálny analyzátor [27, 29]. Blokovú schému zapojenia metódy OFDR vizualizuje obr. 1.14.



Obr. 1.14: Architektúra metódy OFDR [29].

### 1.3.2 Ramanov rozptyl

Ramanov rozptyl je neelastický rozptylový fenomén, kde fotóny prechádzajúceho žiarenia interagujú s vibračnými stavmi molekúl v látke. Týmto javom dochádza k zmene energie fotónu, ktorá sa odzrkadľuje na vlnovej dĺžke rozptýleného žiarenia. Zmena vlnovej dĺžky sa v tomto kontexte nazýva aj ako Ramanovo posunutie. Počas merania sa monitoruje Ramanovo posunutie, šírka vrcholu a výška vrcholu v spektre, ktorých zmeny sú zapríčinené pôsobením vonkajšej aktivity na vlákno [6, 26].

Z rovníc (1.11) a (1.12) je možné odvodiť záver, že koeficienty Ramanovho rozptylu sú vo veľkej miere závislé na teplote. Tento výrok potvrdzuje aj Lu vo svojej publikácii [26], kde opisuje Ramanov rozptyl ako veľmi závislý na teplote a vo veľmi malej miere závislý na tlaku a námahe pôsobiacej na optické vlákno.

Na výpočet Ramanovho rozptylu je možné použiť nasledovné rovnice:

$$P_S(z) = R_S(z)e^{-(\alpha_P+\alpha_S)z}P_0 \text{ a} \quad (1.9)$$

$$P_{AS}(z) = R_{AS}(z)e^{-(\alpha_P+\alpha_{AS})z}P_0, \quad (1.10)$$

kde  $P_0$  je výkon laseru,  $R_S(z)$  a  $R_{AS}(z)$  sú Stokesové (S) a anti-Stokesové (AS) rozptylové koeficienty a  $\alpha_P$ ,  $\alpha_S$ ,  $\alpha_{AS}$  sú útlmové koeficienty pre žiarenie laseru, príp. S, AS žiarenie

$$R_S \cong \frac{1}{\lambda_S^4} \frac{1}{1 - \exp[-\frac{hc\tilde{\nu}}{kT}]} \text{ a} \quad (1.11)$$

$$R_{AS} \cong \frac{1}{\lambda_{AS}^4} \frac{1}{\exp[\frac{hc\tilde{\nu}}{kT}] - 1}, \quad (1.12)$$

kde  $\lambda_S$ ,  $\lambda_{AS}$  sú A a AS vlnové dĺžky,  $\tilde{\nu}$  je Ramanov posun,  $T$  je teplota,  $k$  je Boltzmanova konštanta,  $h$  je Planckova konštanta a  $c$  je rýchlosť svetla vo vákuu [26].

Prvotne sa Ramanov rozptyl používal najmä vo fyzike a v chémii na štúdium molekúl a ich vlastností. Vývojom optoelektroniky však našiel použitie v distribuovanom meraní pomocou optických vlákien, kde svojimi vlastnosťami exceloval hlavne v kategórií distribuovaných teplotných senzorov (angl. Distributed Temperature Sensors – DTS) [26].

### OTDR na báze Ramanovho rozptylu

Architektúra OTDR na báze Ramanovho rozptylu (Raman OTDR) je veľmi podobná architektúre OTDR na báze Rayleigho rozptylu s rozdielom pridania spektrometru pred fotodetektory. Spektrometer slúži na detekciu S a AS spektrálnych čiar, ktoré vznikajú dôsledkom nadbytku alebo nedostatku fotónov vo frekvenčnom pásme. Pozície spektrálnych čiar a intenzity sú merané v závislosti na čase, z ktorých následne pomocou rovnice (1.13) je možné vypočítavať pomer medzi S a AS spektrálnymi čiarami. Výsledný pomer  $R_r$  je teplotne závislý v priemere 0,8 % na 1 °C v rozsahu od 0 °C do 100 °C [1].

$$R_r = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}}\right)^4 - e^{\frac{hc\tilde{\nu}}{kT}}, \quad (1.13)$$

kde  $\lambda_S$ ,  $\lambda_{AS}$  sú A a AS vlnové dĺžky,  $\tilde{\nu}$  je Ramanov posun,  $T$  je absolútna teplota,  $k$  je Boltzmanova konštanta,  $h$  je Planckova konštanta a  $c$  je rýchlosť svetla vo vákuu.

Nevýhodou Raman OTDR je nutnosť použitia laseru s vysokým výkonom, z dôvodu malých hodnôt koeficientov Ramanovho rozptylu  $R_S$  a  $R_{AS}$ , ktorých hodnota je o tri rady nižšia ako v prípade koeficientov Rayleigho rozptylu [1, 26].

### 1.3.3 Brillouinov rozptyl

Brillouinov rozptyl je definovaný ako neelastický rozptylový jav spôsobovaný teplotne generovanými akustickými vlnami vnútri optického vlákna. Prechodom svetelného žiarenia OV je pozdĺž celého vlákna kontinuálne generovaný spontánny Brillouinov rozptyl, ktorý je závislý na zmene teploty príp. námahy pôsobiacej na OV. Tieto variácie sa prejavujú ako zmena frekvencie rozptýleného svetla tiež nazývanej ako Brillouinová frekvencia  $\nu_B$  [29].

Závislosť Brillouinovej frekvencie  $\nu_B$  na okolitej teplote a námahe pôsobiacej na FUT je možné matematicky vyjadriť rovnicou

$$\nu_B(T, \varepsilon) = C_T \Delta T + C_\varepsilon \Delta \varepsilon + \nu_0(T_0, \varepsilon_0), \quad (1.14)$$

kde  $C_T$  a  $C_\varepsilon$  je teplotný koeficient príp koeficient námahy,  $\Delta T$  a  $\Delta \varepsilon$  je zmena teploty v závislosti na  $T_0$  resp. zmena námahy v porovnaní s  $\varepsilon_0$  a  $\nu_0(T_0, \varepsilon_0)$  je referenčná Brillouinová frekvencia v momente  $(T_0, \varepsilon_0)$  [29].

Najpoužívanejšie distribuované meracie techniky založené na Brillouinovom rozptyle sú

- Brillouin OTDR (BOTDR),
- Brillouinová optická analýza v časovej oblasti (angl. Brillouin Optical Time Domain Analysis - BOTDA) [26, 28].

#### Brillouin OTDR

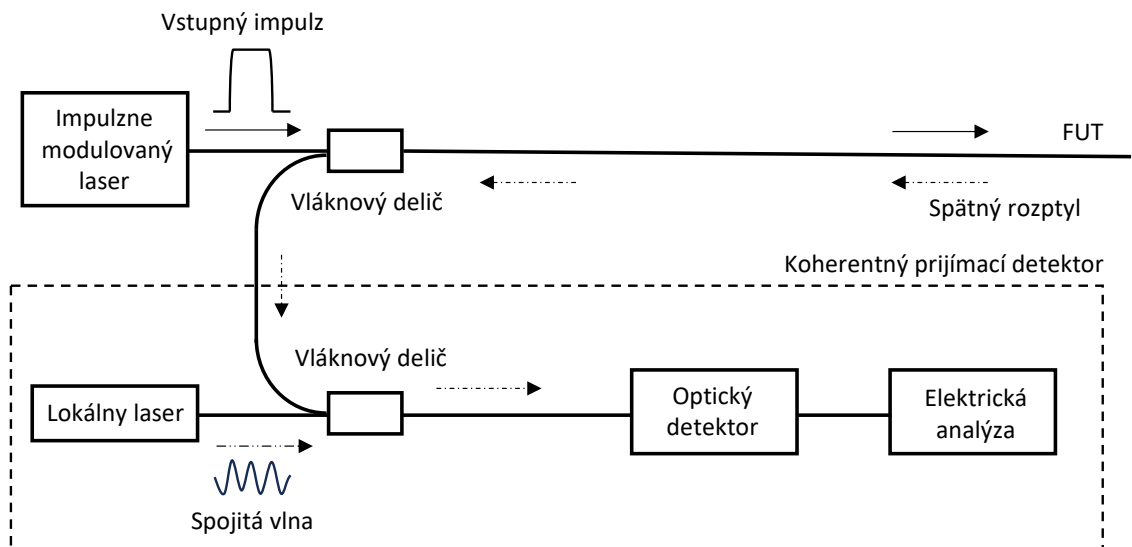
Floris aj Tang v publikáciách [28, 29] opisujú koncept metódy BOTDR analogicky k metóde OTDR. Naopak Lu a Barrias [6, 26] ilustrujú zapojenie meracej techniky BOTDR komplexnejšie viď obr. 1.15, kedy je zapojenie OTDR obohatené o koherentný detektorový prijímač.

Koherentná detekčná technika je implementovaná z dôvodu, že Brillouinov rozptýlený signál je veľmi slabý. Z tohto poznatku práve vyplýva aj zámer vývoja techniky BOTDR, ktorým je zvýšenie meracieho dosahu klasickej OTDR metódy pri meraní teploty a námahy [6]. V Experimente Baa a kol. [30] bol dosiahnutý rekordný merací dosah 51 km s priestorovým rozlíšením 5 m.

Princíp tejto techniky je založený na procese vytvorenia stimulovaného Brillouinovho rozptylu (SBS), ktorý je vytvorený interakciou rozptýleného Brillouinovho signálu s koherentným žiarením so spojitou vlnou, čím je docielené zosilnenie spätne rozptýleného signálu [6, 26].

#### Brillouin OTDA

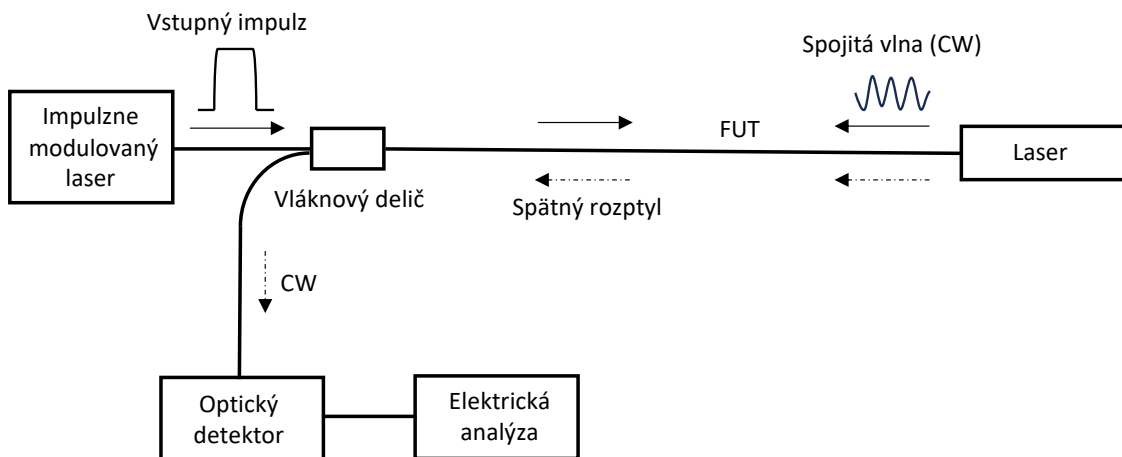
BOTDA je rovnako ako aj BOTDR založené na práci so SBS. Systém využíva protichodne šíriace sa žiarenie so spojitou vlnou, ktorého zdroj je zapojený na opačnom



Obr. 1.15: Architektúra metódy BOTDR [29].

konci FUT. Šíriaci sa pulz vytvára spontánny Brillouinov rozptyl (SpBS) s tým, že SBS vzniká len na mieste, kde sa vlny signálov prekrývajú. SBS je následne na strane vyžarovania impulzov detekovaný pomocou fotodetektorov ako funkcia času [26, 29].

Metóda BOTDA je v porovnaní s BOTDR určená na meranie teploty a námahy s nižším dosahom merania, ale s väčším priestorovým rozlíšením. Nevýhodou je nutnosť prístupnosti k oboj koncom meracieho vlákna z dôvodu prítomnosti laseru so spojitou vlnou [29].



Obr. 1.16: Architektúra metódy BOTDA [6].

## 2 Aktuálny stav skúmanej problematiky

Po analýze dostupných zdrojov je možné konštatovať, že všetky kategórie optických vláknových senzorov sa v dnešnej dobe aktívne využívajú na zabezpečenie proti nežiadúcej aktivite.

Allwood v článku [32] uvádza metódy založené na meraní rozptylu a interferencií ako zastaralé a opisuje použitie FBG senzorov ako moderný prístup k zabezpečovaniu proti vniknutiu. Avšak predovšetkým komerčná sféra jeho výrok vyvracia, lebo väčšina firiem aktívne tieto metódy využíva na zabezpečovanie.

Firma RBtec za využitia merania spätného Rayleigha rozptylu poskytuje svojim zákazníkom službu zabezpečenia perimetru objektu vedením vlákna na plote alebo zakopaním pod zem. Zaujímavým produktom portfólia je technológia Marinet, ktorá umožňuje ochranu perimetru nad aj pod vodnou hladinou. Všetky zariadenia pracujú s jednovidovým meracím vláknom s dĺžkou do 100 km [31].

Rovnako tak firma Sensonic využitím spätnej reflektometrie získava informácie z meraného vlákna uloženého pozdĺž železničných tratí. Na základe pokročilej techniky umelej inteligencie poskytuje možnosť lokalizácie prechodu osôb cez kolaje, zosuvov pôdy a pozície vlakov v reálnom čase [33].

Autori [34] v rámci experimentu zostavili senzor na báze vláknového Machovho–Zenderovho interferometru, ktorý mal identifikovať pohyb v blízkosti plotu. Vyhodnocovanie prebiehalo pomocou riadiaceho počítača, ktorý mal na základe auto rozpoznávacieho softvéru spúšťať alarmy.

Zaujímavosťou je využitie Sagnacovho interferometru na zabezpečenie plotu perimetru. Na zostavenie interferometru citlivého na vibrácie je potrebné použiť špeciálne vlákno s udržiavaním polarizácie žiarenia (Polarization Maintaining Fiber – PMF). Výsledky práce ukazujú, že zariadenie dokázalo s vysokou úspešnosťou odolávať spúšťaniu falošných alarmov spôsobených vetrom a stále detekovať narušiteľa [35].

Využitie našiel v zabezpečení perimetrov aj Michelsonov interferometer, ktorý je v štúdiu použitý na meranie vibrácií z vlákna zakopaného pod zemou, na plote a okne [36].

Použitie FBG senzoru v rámci zabezpečovania v domových podmienkach implementoval Allwood [37]. Jednotlivé FBG mriežky boli testované v rámci zaliatia do betónu, pod plávajúcu podlahu, umiestnenia na plot a použitia ako digitálneho senzoru na detekciu zavretia dverí. Variabilitu použitia potvrdili pozitívne výsledky merania bez nutnosti zosilňovania signálu.

Naopak Catalano a spol. v článku [38] používajú podložku obsahujúcu pole FBG mriežok na detekciu narušenia priestoru. Vyhodnocovací softvér dokázal z posunu Braggovej vlnovej dĺžky identifikovať presnú polohu osoby v rámci pola senzorov.

## 3 Snímacia časť zabezpečovacieho systému

Úlohou tejto práce je zhotovenie zabezpečovacieho systému schopného detekovať pohyb osôb v jednotlivých miestnostiach, príp. celých podlažiach. Pri detekcii pohybu má zabezpečovací systém na základe vstupných podmienok za cieľ vyhodnotiť situáciu a v určitých prípadoch reagovať na tento stav potrebným úkonom.

Následujúce kapitoly sa budú venovať výberu vhodnej architektúry pre potreby zabezpečenia objektov, následným vyhotovením snímačej časti a zhodnotením výsledkov v rámci testovania danej architektúry.

### 3.1 Výber architektúry snímačej jednotky

V rámci teoretickej časti práce sú rozobraté základné typy optických vláknových senzorov, z ktorých je pre potreby tejto práce žiadúce vybrať najvhodnejší. Táto kapitola sa zaoberá selekciou adekvátneho OVS použiteľného na zabezpečovanie objektov proti nežiadúcemu pohybu. Proces výberu sa opiera o poznatky nadobudnuté v rámci teoretickej sekcie práce.

Pre správnu formuláciu výsledkov je vytvorená tabuľka (3.1) so všetkými vyššie spomenutými optickými vláknovými senzormi. Stĺpce tabuľky obsahujú vlastnosti jednotlivých OVS, na základe ktorých prebieha selekcia danej architektúry. Etalónom pre výber je virtuálna architektúra, ktorá je spôsobilá na

- snímanie aktivity pozdĺž celej dĺžky vlákna,
- snímanie námaľy pôsobiacej na vlákno,
- náročnosť vyhotovenia je čo najnižšia čo radikálne ovplyvňuje aj ekonomický faktor OVS.

Stĺpce náročnosť a cena využívajú personalizovanú stupnicu implementujúcu znak „\*“. Počet znakov „\*“ pri náročnosti je stanovený na základe dielov potrebných na zostavenie snímačej jednotky, príp. následnej náročnosti spracovania výstupného signálu z fotodetektoru. Naopak pri cene je počet „\*“ určený pomocou priemerých cien jednotlivých komponentov uvedených na internetových obchodoch [39, 40]. Stĺpce vibrácie a teplota slúžia na zaznačenie senzitivity daného typu OVS na zmeny teploty, príp. vibrácií. Stĺpec meranie obsahuje spôsob merania danej architektúry, ako už je spomenuté v rámci teoretickej časti práce, na snímanie fyzikálnej veličiny je možné použiť celú dĺžku OV alebo len určitú časť napr. mriežku.

Posledný stĺpec tabuľky označený ako vhodné je vyhodnotením použiteľnosti daného typu pre zabezpečovanie objektov. Hodnota stĺpca je pridelená na základe porovnania jednotlivých vlastností typov OVS s etalónovým OVS určeným v úvode kapitoly. Ak daný typ architektúry vyhovuje všetkým podmienkam dostáva označenie áno, v opačnom prípade mu je pridelené nie.

Tab. 3.1: Porovnanie vlastností architektúr jednotlivých typov OVS a určenie ich vhodnosti pre použitie v zabezpečovacích systémoch.

| Architektúra OVS | Náročnosť | Cena | Vibrácie | Teplota | Meranie    | Vhod. |
|------------------|-----------|------|----------|---------|------------|-------|
| MI               | *         | *    | ✓        | ✓       | celá dĺžka | áno   |
| MZI              | *         | *    | ✓        | ✓       | celá dĺžka | áno   |
| FPI              | *         | *    | ✓        | ✓       | bodové     | nie   |
| SI               | **        | *    | ✓        | ✓       | bodové     | nie   |
| FBG              | *         | *    | ✓        | ✓       | bodové     | nie   |
| LPG              | *         | *    | ✓        | ✓       | bodové     | nie   |
| TFBG             | *         | *    | ✓        | ✗       | bodové     | nie   |
| CFBG             | *         | *    | ✓        | ✓       | bodové     | nie   |
| Rayleigh OTDR    | **        | **   | ✓        | ✓       | celá dĺžka | áno   |
| Rayleigh OFDR    | ***       | ***  | ✓        | ✓       | celá dĺžka | áno   |
| Raman OTDR       | ***       | ***  | ✗        | ✓       | celá dĺžka | nie   |
| BOTDR            | ***       | ***  | ✓        | ✓       | celá dĺžka | áno   |
| BOTDA            | ***       | ***  | ✓        | ✓       | celá dĺžka | áno   |

### Nevhodné typy OVS

Ako uvádza tab. 3.1 zo všetkých trinástich spomenutých OVS spĺňa podmienky stanovené etalónom šesť. Sensory na báze difrakčných štruktúr nevyhovovali z dôvodu spôsobu merania, lebo princíp týchto typov senzorov spočíva v meraní v mieste mriežky, teda bodovom meraní. Túto nevýhodu je možné čiastočne eliminovať použitím väčšieho počtu mriežok s rôznou Braggovou rezonančnou frekvenciou implementovaných do meracieho vlákna, ale v konečnom dôsledku to negatívne ovplyvnilo cenu vyhotovenia.

Rovnako tak aj FPI je uspôsobený na bodové meranie, keďže princíp merania fyzikálnej veličiny je založený na zmene vzdialeností reflektívnych plôch osadených v dutine senzoru, vid 1.1.1. Aj keď je SI prevažne určený na meranie axiálnych rotácií, použitím vhodných komponentov je teoreticky možné ho využiť aj na meranie vibrácií, vid 1.1.2. Z vlastností SI však vyplýva, že vibrácie je možné monitorovať len v presnom strede slučky interferometru a prípadná zmena na detekciu vibrácií by sa prejavila v náročnosti konštrukcie.

Neadekvátny je rovnako Raman OTDR, ktorého neúspech stojí za vlastnosťami Ramanovho rozptylu. Keďže Ramanov rozptyl nie je citlivý na zmeny námahy, prírodných veličín, nie je pomocou Raman OTDR možné merať nič iné ako zmeny teploty.

## Vhodné typy OVS

Táto podkapitola sa venuje šiestim typom OVS, ktoré sa v rámci tabuľky (3.1) javia ako vhodné.

Najviac vyhovujúcimi sú architektúry MI a MZI z dôvodu nízkej náročnosti zapojenia, čo pozitívne vplýva na cenu vyhotovenia. V porovnaní s metódami založenými na meraní rozptylov, interferometre nepotrebujú na svoju prevádzku prítomnosť impulzných modulátorov, spektrálnych analyzátorov, príp. pomocných budiacich laserov. Keďže pre potreby tejto práce nie je nutná ani lokalizácia narušiteľa v rámci danej miestnosti, ktorú poskytujú metódy založené na meraní rozptylov, všetky dôvody smerujú k výberu architektúr MI a MZI, ktoré budú v ďalšej časti práce otestované a porovnané.

## 3.2 Zapojenie a testovanie vybranej architektúry

Zostavenie a meranie interferometrov prebiehalo v laboratóriu OptoLab (miestnosť SC 5.52) na Technickej 12 v Brne. Pre potreby testovania bola prítomná testovacia osoba priemerného vzrastu 183 cm s hmotnosťou 81 kg. Testovalo sa v štyroch kolách a to s použitím obuvi, bez použitia obuvi, kombinácia predošlých testov so šliapnutím na meracie vlákno a bez šliapnutia. Scenár testovania pozostával zo štyroch krokov v nasledovnom poradí:

1. otvorenie dverí,
2. vstúpenie osoby do objektu,
3. zatvorenie dverí,
4. chôdza v miestnosti po vopred stanovenej trase, viď obr. 3.8, príp. 3.14.

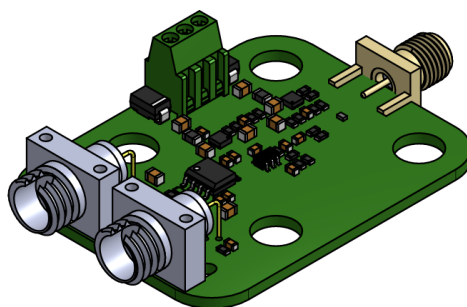
### 3.2.1 Použité komponenty

V teoretickej časti práce 1.1.4 je spomenuté, že MI je v podstate polovica MZI len s rozdielom prídania reflektívnych plôch. Táto vlastnosť umožňuje použitie rovnakých komponentov a ich zdieľanie medzi jednotlivými vyhotoveniami architektúr, čo uľahčuje priebeh testovania a merania. Nasledujúca časť sa venuje použitým komponentom, ktoré sú pre všetky zapojenia rovnaké.

#### Koheron PD100B

Ako aj názov napovedá, komponent PD100B od spoločnosti Koheron je balančný fotodetektor so šírkou pásma 100 MHz a ziskom 39 KV/A, slúži na detekciu žiarenia. Daný typ operuje v rozsahu 900 nm až 1700 nm a využíva na detekciu InGaAs fotodiódy [40].

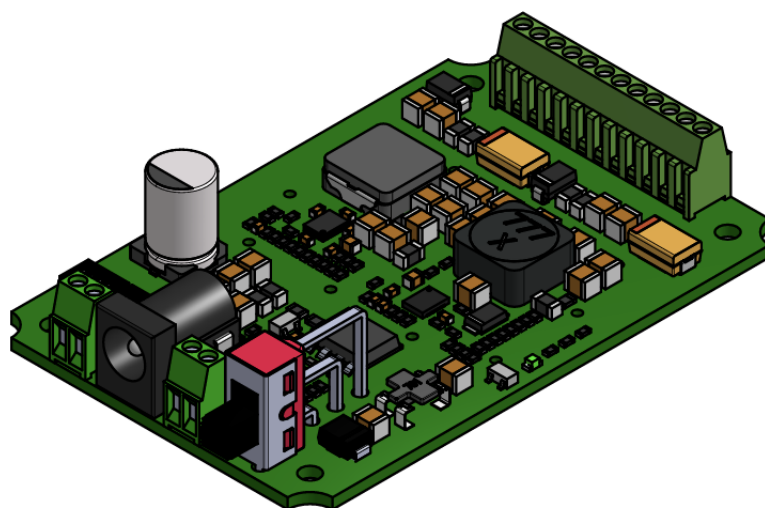




Obr. 3.1: Ilustrácia balančného fotodetektoru Koheron PD100B [40].

### Koheron SPS200

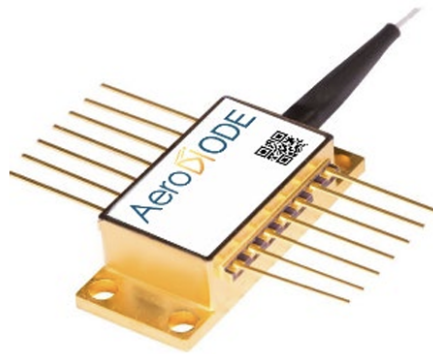
Koheron SPS200 je duálny zdroj s výkonom 36 W ponúkajúci dva výstupné porty, ktoré sú nastavovateľné v rozmedzí od  $\pm 5$  V do  $\pm 12$  V. Zariadenie je potrebné napájať zdrojom s napätím od 18 V do 33 V [40].



Obr. 3.2: Ilustrácia duálneho zdroja napájania Koheron SPS200 [40].

### AeroDIODE Model 2

AeroDIODE Model 2 je motýľová laserová dióda s centrálnou vlnovou dĺžkou žiarenia 1550 nm s výstupným výkonom min. 40 mW v móde so spojitou vlnou. Laserová dióda uchytená v pomocnom ovládači ako napr. Thorlabs CLD1015 poskytuje pohodlnejší a rýchlejší spôsob práce s diódou [41].



Obr. 3.3: Ilustrácia motýlovej laserovej diódy AeroDIODE Model 2 [41].

### **Thorlabs CLD1015**

CLD1015 je zariadenie slúžiace na riadenie motýľových (angl. butterfly) laserových diód a ich chladenie. Laserová dióda je uchytená v držiaku, ktorý zabezpečuje stabilitu a bezpečnosť pri manévrovaní so zariadením. Jednotka ponúka vysokú stabilitu na výstupe s teplotnou kompenzáciou diódy s presnosťou  $0,005^{\circ}\text{C}$  na 24 hodín, čím zaručuje predĺženie životnosti diódy. CLD1015 ponúka možnosť prepínania filtra redukcie šumu a modulácie výstupu pre široké spektrum laserových diód s rodiny Thorlabs. Nastavovanie parametrov prebieha pomocou dotykovej obrazovky o rozmere 4,3 palcov [42].



Obr. 3.4: Ilustrácia ovládača laserových diód Thorlabs CLD1015 [42].

## Ostatné komponenty

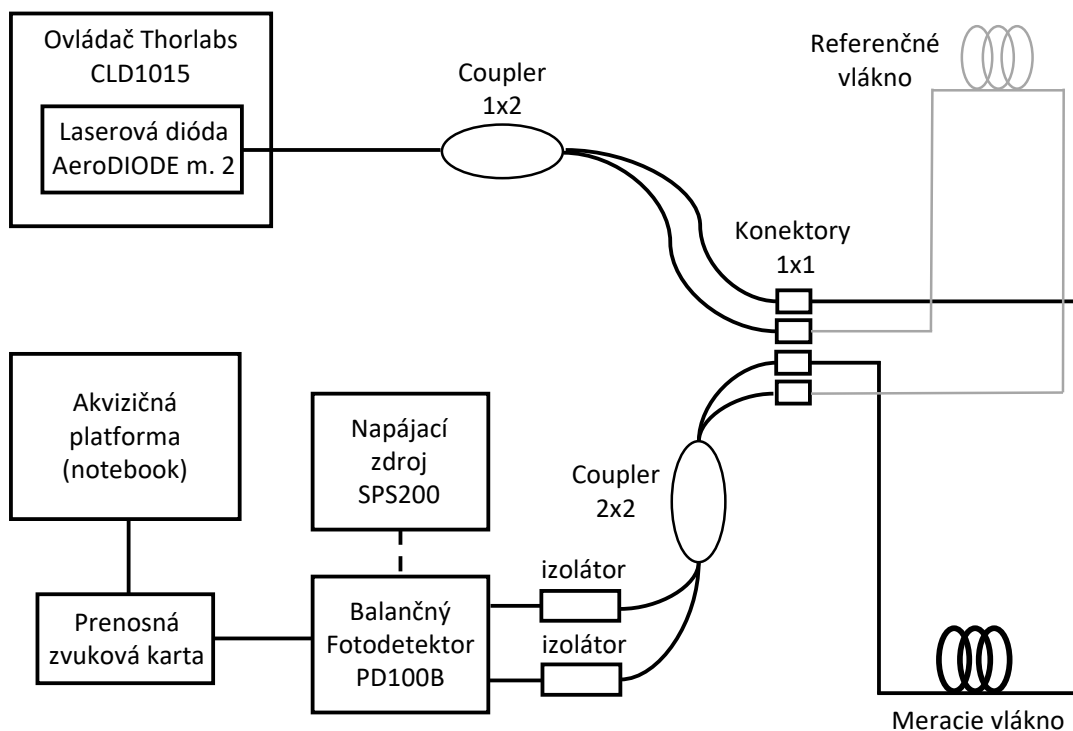
V rámci zapojenia boli použité ďalšie komponenty ako

- izolátory slúžiace ako prevencia proti odrazom signálov,
- couplery s teoretickým deliacim pomerom 50:50,
- konektory slúžiace na spájanie jednotlivých optických vlákien.

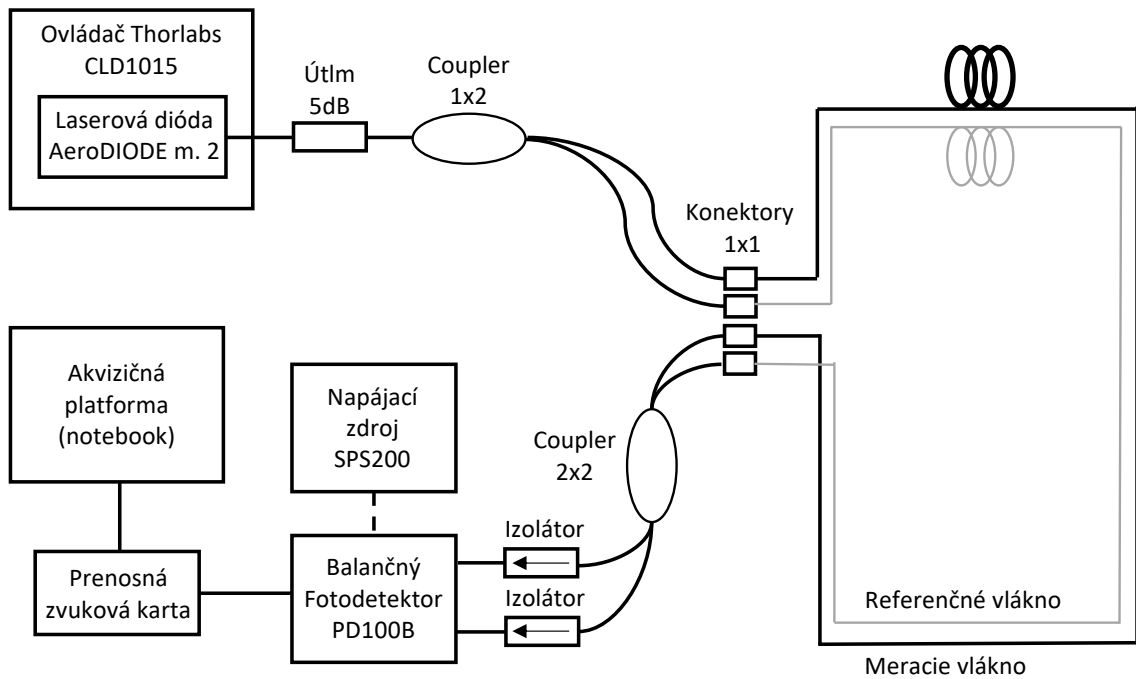
### 3.2.2 Testovanie zapojenia MZI

V rámci testovania zapojenia MZI boli testom podrobené dva varianty vedenia referenčného vlákna. Nakoľko umiestnenie referenčného vlákna v blízkosti zariadenia slúžiaceho na spracovávanie dát je pomerne zložitá z estetického hľadiska, bolo brané do úvahy aj zapojenie s pozdĺžnym vedením meracieho a referenčného vlákna. Pozdĺžne vedenie vlákien bolo docielené pomocou kábla, ktorý obsahoval dva pevne spojené nezávislé optické káble. Útlm meracieho a referenčného vlákna činil 0,07 dB, príp. 0,05 dB.

Zapojenie jednotlivých komponentov spomenutých v predošlej kapitole je takmer identické. Jediný registrovateľný rozdiel je v umiestnení referenčného vlákna v rámci architektúry. Blokové schémy oboch zapojení je možné vidieť v obr. 3.5 a 3.6.



Obr. 3.5: Bloková schéma zapojenia MZI s odizolovaým referenčným vláknom pre potreby testovania.

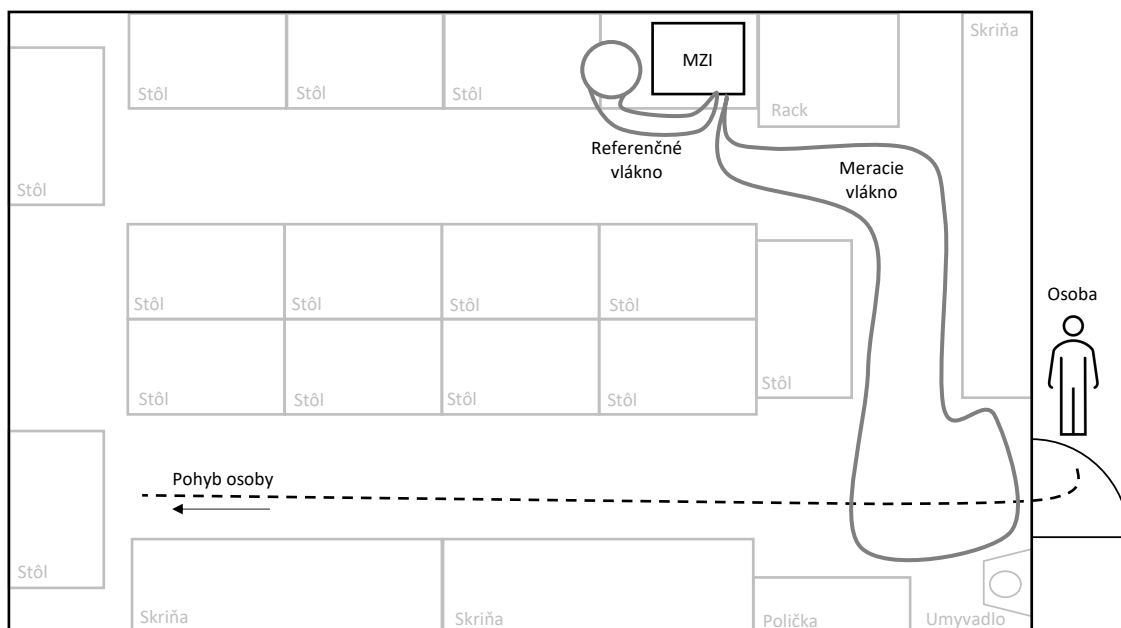


Obr. 3.6: Bloková schéma zapojenia MZI s kombinovaným referenčným a meracím vláknom pre potreby testovania.

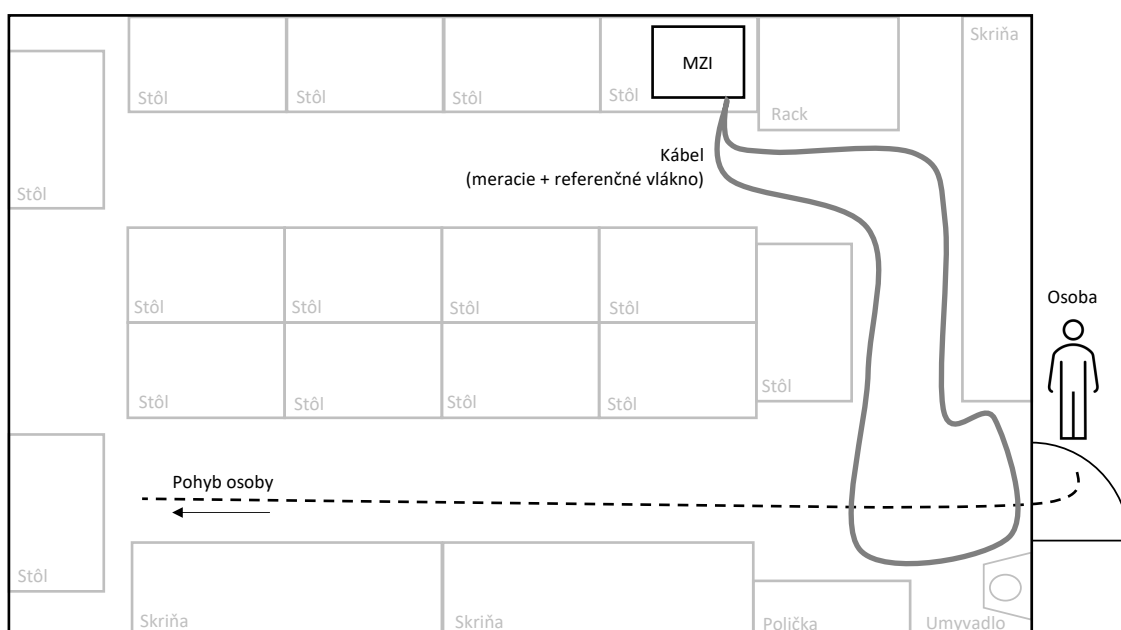
Poloha meracieho vlákna v miestnosti bola ovplyvnená štandardnou dĺžkou optického kábla. S dĺžkou 15 m nebolo možné optimálne položiť meracie vlákno po celej ploche testovacieho objektu. Reálne uloženie vlákna v rámci objektu ilustruje obr. 3.7, príp. 3.8, ktoré sa ukázalo pre potreby testovania ako vyhovujúce, nakoľko umožňovalo pozorovať zmeny amplitúdy pri postupnom vzdalovaní osoby od hranice meracieho vlákna. Na týchto obrázkoch je rovnako vykreslená aj trajektória pohybu prítomnej osoby.

### Priebeh merania

Pre dodržanie korektnosti merania a výsledkov, hodných na porovnanie bolo pre obe zapojenia nutné dodržať rovnaké parametre jednotlivých komponentov. Vo všetkých kolách testovania bol použitý budiaci prúd laseru  $I_{bl}$  rovný 30 mA. Otočný potenciometer na zvukovej karte s označením GAIN bol v maximálnej polohe, čím bolo dosiahnutých optimálnych výsledkov bez registrovania abnormálnej hladiny šumu na výstupe zvukovej karty. Výstup zvukovej karty bol pomocou softvéru Voice Memos nahrávaný do notebooku.



Obr. 3.7: Poloha meracieho a referenčného vlákna v miestnosti SC 5.52 pri testovaní MZI s odizolovaným referenčným vláknom.



Obr. 3.8: Poloha meracieho a referenčného vlákna v miestnosti SC 5.52 pri testovaní MZI s kombinovaným referenčným a meracím vláknom.

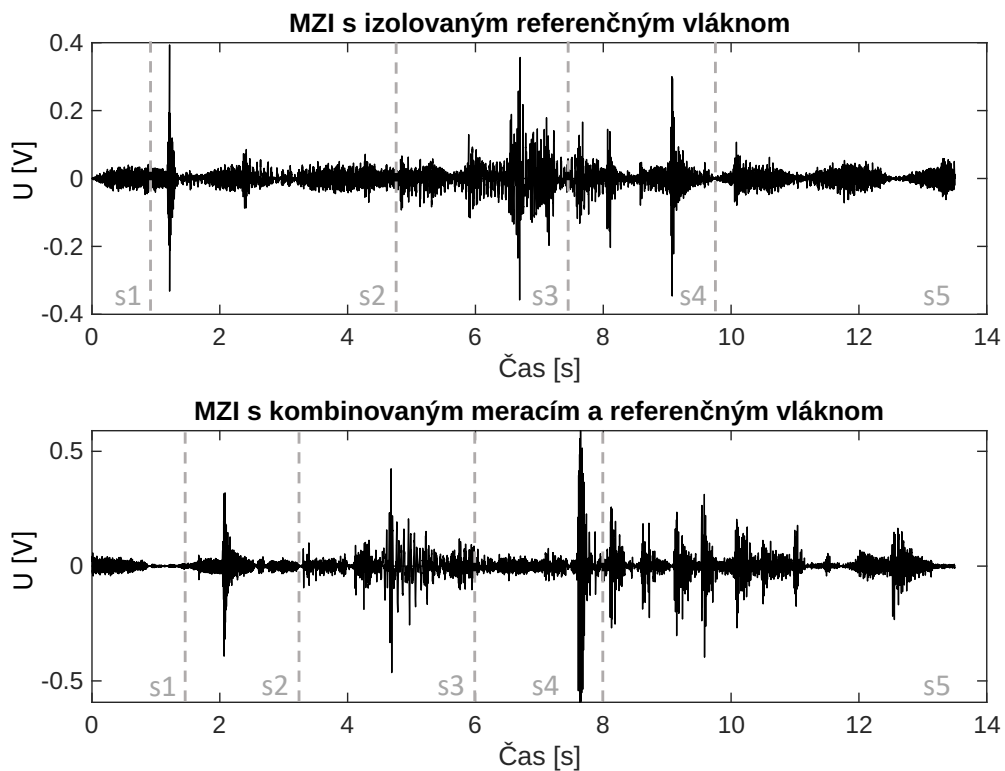
### Výsledky merania

Jednotlivé nahrané úseky bolo prvotne potrebné konvertovať z proprietárneho formátu .m4a spoločnosti Apple do Matlabom podporovaného .wav formátu. Program

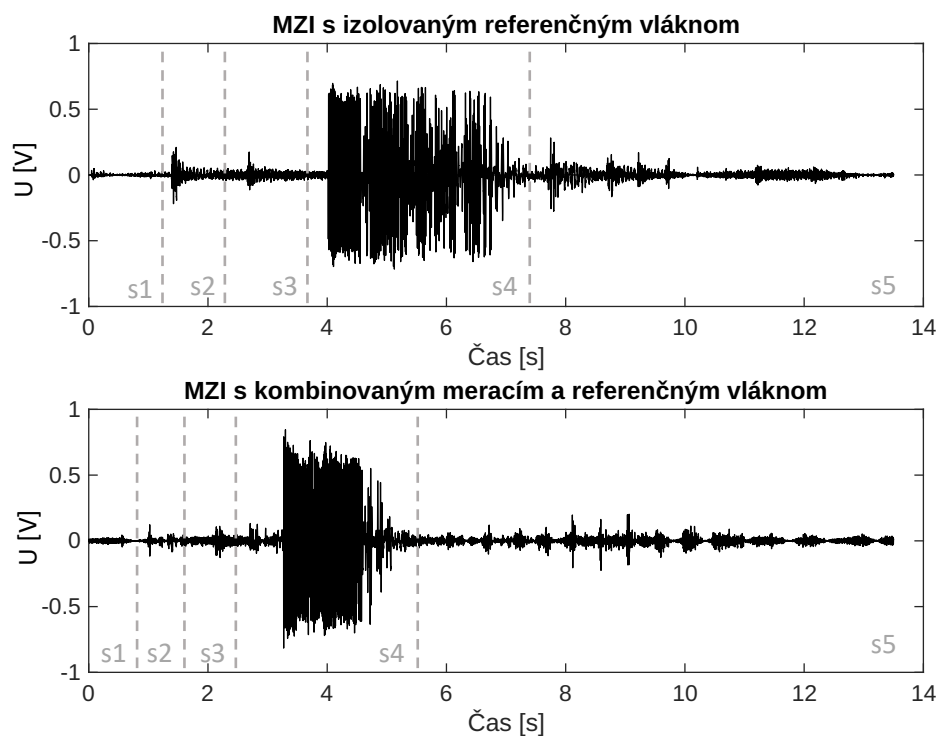
Matlab bol použitý z dôvodu priaznivejšej prezentácie nameraných dát, príp. ich ďalšieho spracovania.

V nasledujúcich obrázkoch sú prezentované časové priebehy zapojení pri podmienkach a scenároch určených v úvode kapitoly 3.2. Pre lepšiu orientáciu v jednotlivých nahrávkach sú časové priebehy rozdelené pomocou množiny sektorov s1 až s5. Jednotlivé prvky množiny vyjadrujú kroky scenára, ktoré poverená osoba vykonáva. Priradenie hodnoty k prvku je vyjadrené ako:

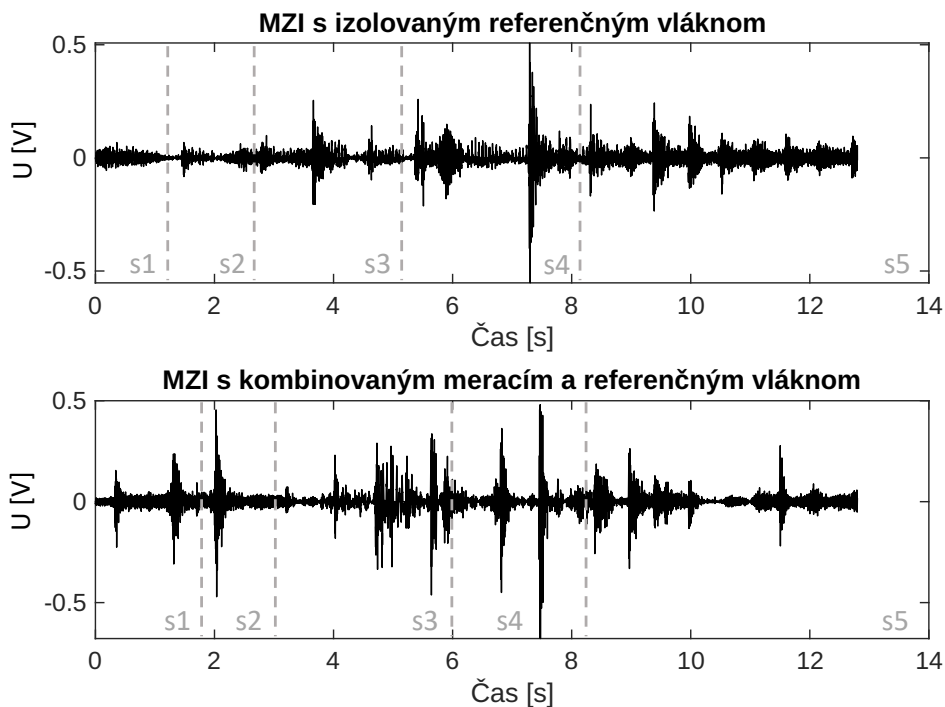
- s1 = otváranie dverí a vchod do miestnosti,
- s2 = zatvorenie dverí,
- s3 = prechod cez prvú vetvu meracieho vlákna,
- s4 = prechod cez druhú vetvu meracieho vlákna,
- s5 = postupné vzdalovanie sa od meracieho vlákna.



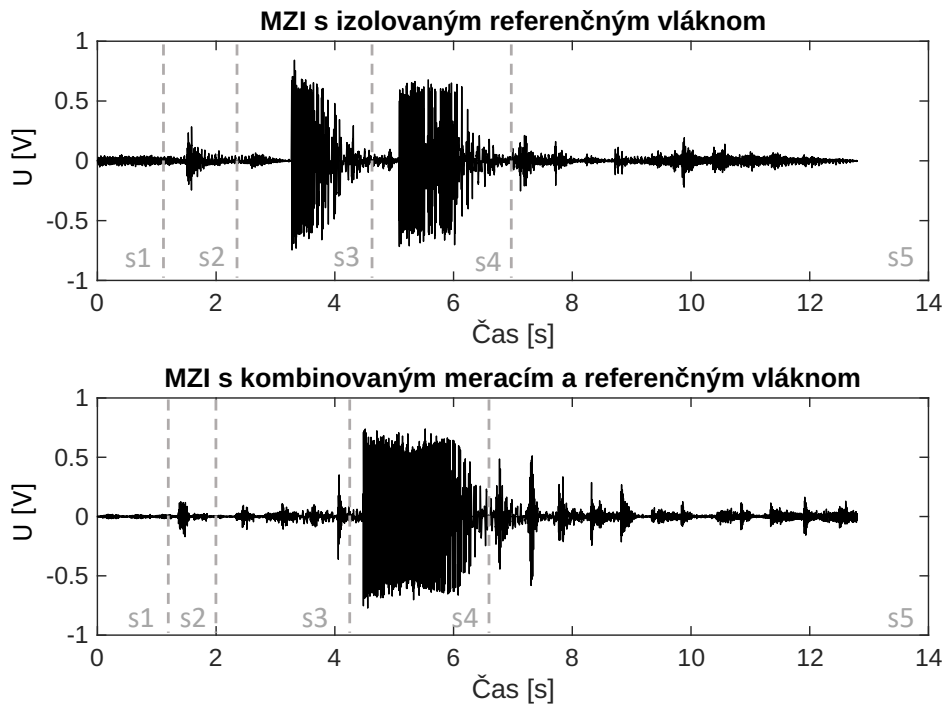
Obr. 3.9: Výsledky merania jednotlivých zapojení MZI pri prechode osoby bez obuvi bez šliapnutia na meracie vlákno.



Obr. 3.10: Výsledky merania jednotlivých zapojení MZI pri prechode osoby bez obuvy so šliapnutím na meracie vlákno.



Obr. 3.11: Výsledky merania jednotlivých zapojení MZI pri prechode osoby s obuvou bez šliapnutia na meracie vlákno.



Obr. 3.12: Výsledky merania jednotlivých zapojení MZI pri prechode osoby s obuvou so šliapnutím na meracie vlákno.

Z nameraných výsledkov možno usúdiť niekoľko poznatkov. Vo väčšine prípadov v sektore s1, keď boli dvere otvárané, nie je na výstupe interferometru pozorovateľná takmer žiadna zmena. Rovnako tak ani pri prehraní nahrávky nie je možné zreteľne zaregistrovať zmeny zvuku. Jediný prípad, kedy bolo možné pozorovať aj počuť otváranie dverí bolo pri zapojení s kombinovaným meracím a referenčným vláknom pri testovaní s topánkami bez šliapnutia na vlákno, vid 3.11.

V rámci sektoru s2 je vo všetkých prípadoch zapojení vizuálne aj audiálne registrovateľný akt zatvárania dverí. Rovnako tak aj v sektoroch s3 a s4 je jasne pozorovateľná najvyššia výchylka amplitúdy, lebo v danom momente sa osoba nachádzala v najmenej vzdialenosti od meracieho vlákna.

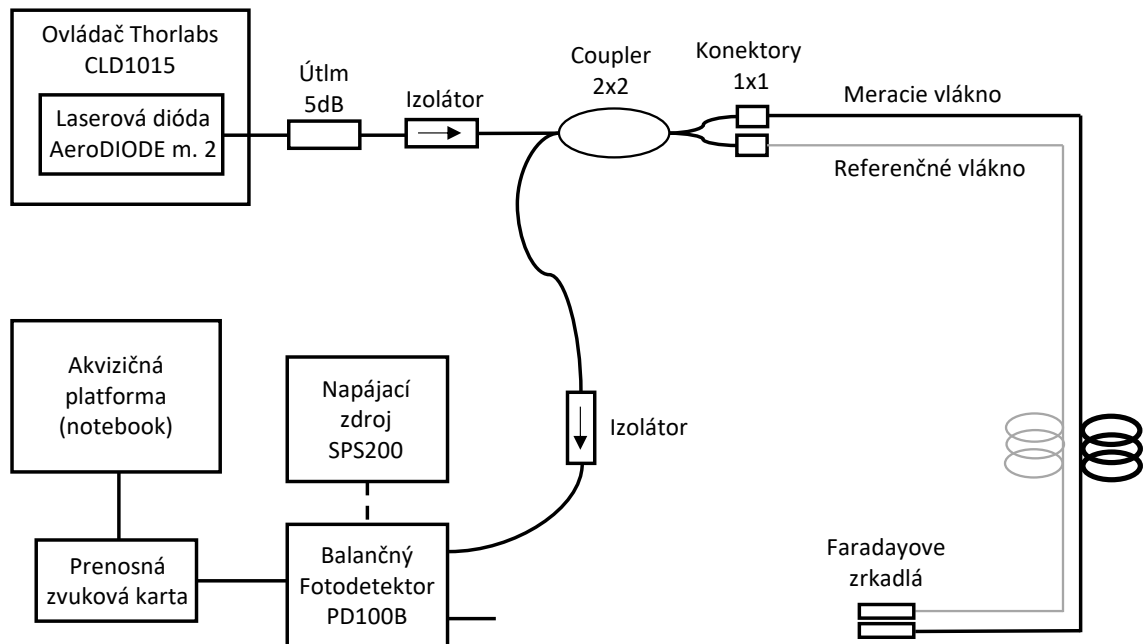
Zo sektoru nahrávky s5 je vo väčšine nahrávok vizuálne veľmi náročné usúdiť smer pohybu osoby. MZI s izolovaným referenčným vláknom vykazuje v troch zo štyroch meraní predpokladaný pokles amplitúdy pri vzdalovaní sa osoby od meracieho vlákna. Naopak MZI s kombinovaným meracím a referenčným vláknom vykazuje čiastočný pokles amplitúdy len v dvoch prípadoch. Tento neočakávaný jav mohol byť spôsobený prípadnou nekonzistenciou chôdze osoby prítomnej pri meraní. Pre dosiahnutie presnejších výsledkov sa vyžaduje opakované meranie so zameraním na vzdalovanie sa objektu od meracieho vlákna, čo nie je predmetom skúmania tejto práce.



Pri celkovom pohľade na všetky nahrávky je možné vyvodiť záver, že vo všetkých prípadoch bola chôdza v obuvi odzrkadlená vo vyššej amplitúde signálu a bola zreteľnejšie detekovateľná. Rovnako tak aj priamy kontakt osoby s vláknom je v porovnaní len s priblížením skoro dvojnásobne intenzívnejší z hľadiska výchylky amplitúdy.

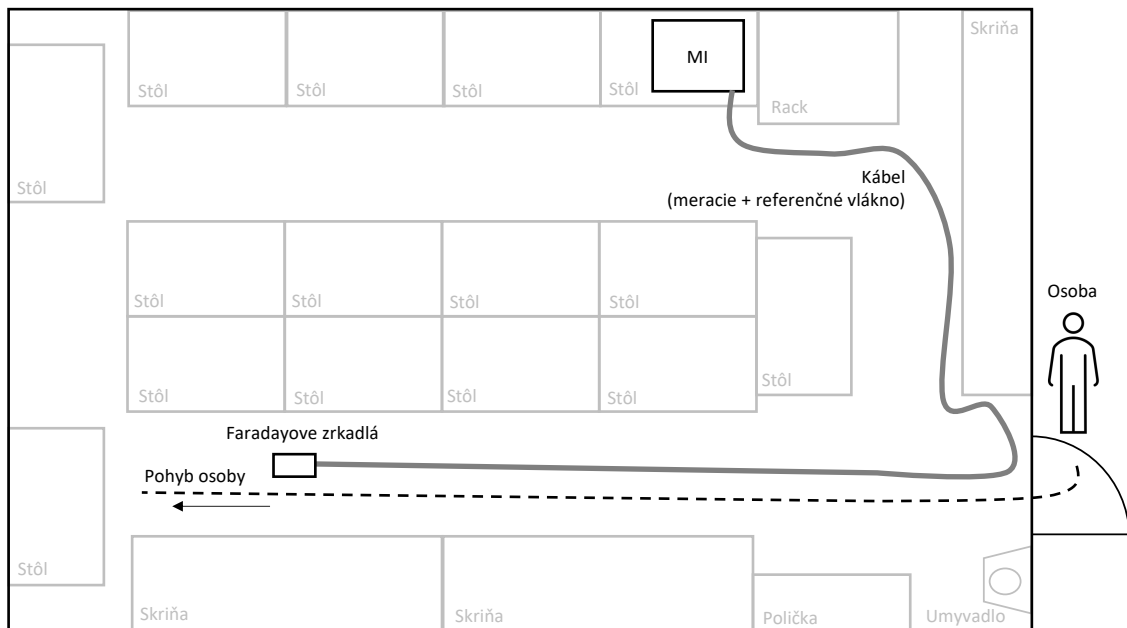
### 3.2.3 Testovanie zapojenia MI

Na zapojenie Michelsonovho interferometru boli použité rovnaké diely ako v predchádzajúcich zapojeniach MZI. Keďže architektúra MI je jemne odlišná od MZI, bolo zapojenie uskutočnené podľa obr. 3.13. Pre dosiahnutie plnej funkčnosti bolo nutné zapojiť aj dve reflektívne plochy na koniec meracieho a referenčného vlákna, ktoré boli v našom prípade dve rozličné Faradayove zrkadlá. Rozličné parametre jednotlivých zrkadiel boli implementované z dôvodu momentálnej nedostupnosti zrkadiel na pracovisku.



Obr. 3.13: Bloková schéma zapojenia MI s kombinovaným meracím a referenčným vláknom.

Veľkou výhodou MI je, že pri ukladaní vlákna nie je potrebné uzatvoriť slučku. Z tohto dôvodu bolo naše 15m vlákno položené optimálnejšie ako v prípade MZI. Uloženie vlákna v rámci miestnosti bolo z hľadiska zabezpečenia čo najvyššej výchylky amplitúdy umiestnené v blízkosti trajektórie pohybu osoby. Presnú polohu vlákna v miestnosti opisuje obr. 3.14.



Obr. 3.14: Poloha meracieho a referenčného vlákna v miestnosti SC 5.52 pri testovaní MI s kombinovaným referenčným a meracím vláknom.

### Priebeh a výsledky merania

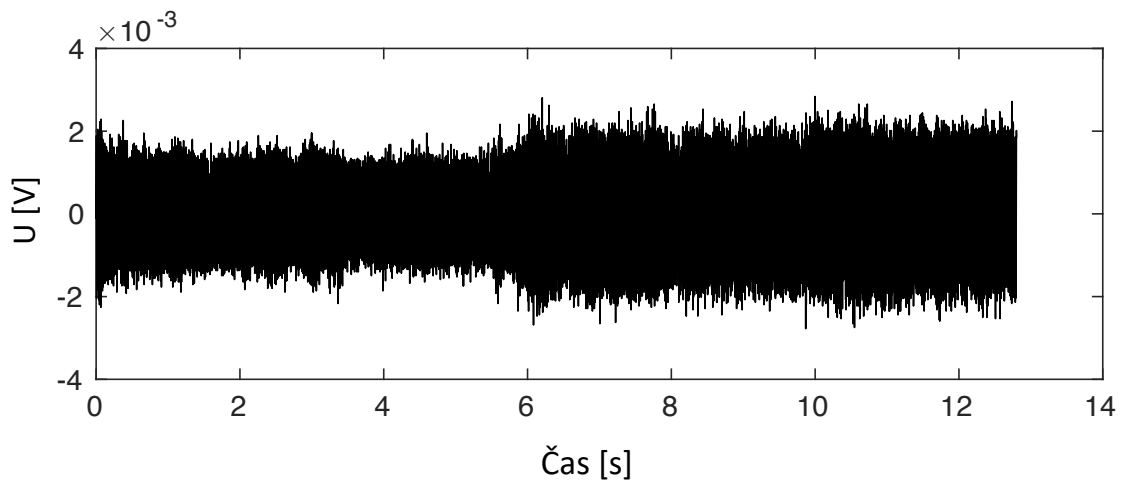
Pri meraní za pomoci MI bol v prvotnej fáze merania nastavený budiaci prúd laseru  $I_{bl} = 30 \text{ mA}$ , teda rovnaký ako v prípade merania MZI. Po zapnutí nahrávania výstupu zvukovej karty s maximálnym nastavením zosilnenia nebolo možné vidieť žiadne zmeny priebehu pri prechode osoby popri vlákne. Na základe tohto faktu bol zvýšený budiaci prúd laseru na  $I_{bl} = 50 \text{ mA}$ , čím sa na výstupe zvukovej karty začali zobrazovať veľmi malé zmeny. Na obrázku 3.15 v čase 6 s je ilustrovaná zmena z pokojovej hodnoty interferometru na hodnotu odpovedajúcu stlačeniu optického vlákna rukou.

Z dôvodu nízkej amplitúdy bol časový priebeh prevedený do frekvenčného spektra závislého na čase. Pre potreby prevodu bol použitý program Matlab. Vo výslednom spektrograme (3.16) je možné detekovať zmeny frekvencie a intenzity v čase  $> 6 \text{ s}$ .

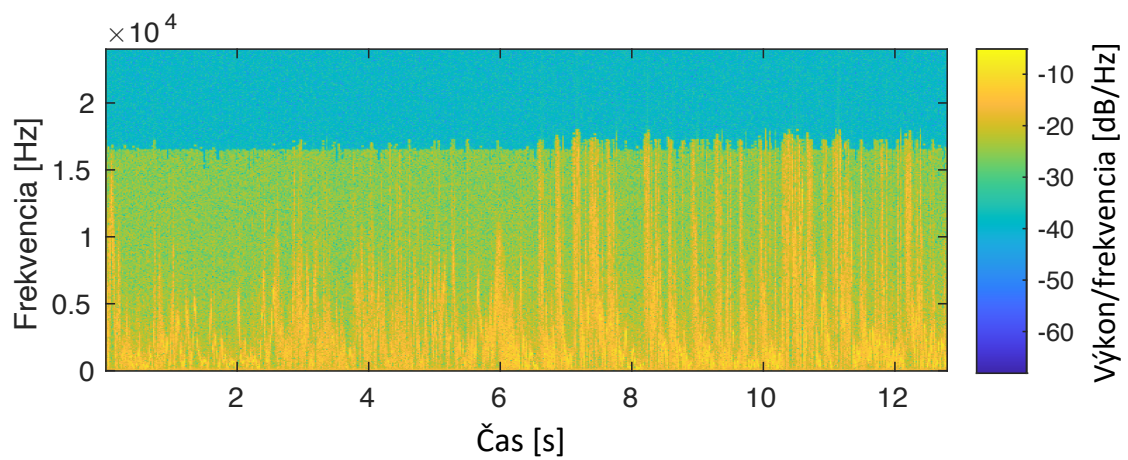
### 3.2.4 Záver testovania

Z výsledkov testov zostáva vydedukovať, ktoré zapojenie je pre použitie pri zabezpečovaní objektov najvhodnejšie. Pri meraní pomocou MI, došlo pravdepodobne z dôvodu použitia dvoch rozličných zrkadiel na koncoch vlákien k čiastočnej nefunkčnosti interferometru, preto nedokázal otestovaný MI konkurovať testovaným MZI.

MZI s kombinovaným meracím a referenčným vláknom je viac výhodnou konfiguráciou, lebo racionálne rieši problém umiestnenia referenčného vlákna. Pri pohľade na jednotlivé priebehy vykazuje aj o niečo väčšiu citlivosť ako jeho oponent.



Obr. 3.15: Časový priebeh zapojenia MI s kombinovaným meracím a referenčným vláknom.



Obr. 3.16: Spektrogram zapojenia MI s kombinovaným meracím a referenčným vláknom.

## 4 Návrh zabezpečovacieho systému

Na základe testovacieho merania bola vybraná najvýhodnejšia architektúra snímacej časti zabezpečovacieho systému. V tejto kapitole sa pozornosť venuje vytvoreniu návrhu celkovej systémovej architektúry, ktorá pokladá základ pre ďalšie vypracovanie praktickej časti.

### 4.1 Požiadavky na systém

Požiadavky na systém boli za využitia poznatkov nadobudnutých z teoretickej časti práce a osobnostných preferencií stanovené následovne. Zariadenie má vo výslednej fáze byť schopné:

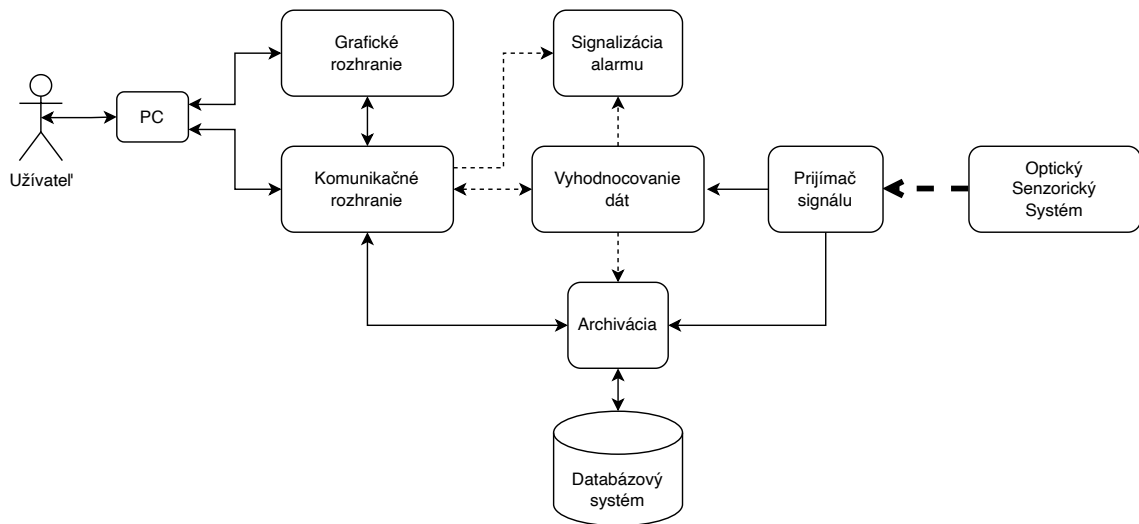
- prijímať analógový signál z výstupu vláknového sensorického systému,
- ukladať prijaté dáta pre potreby ďalšieho spracovania,
- vyhodnocovať prijímaný signál s čo najväčšou odolnosťou voči falošným alarmom,
- signalizovať prítomnosť nežiadúcej aktivity v okolí senzoru,
- obojsmerne komunikovať s okolitými zariadeniami a prípadne aj graficky poskytovať prijaté dáta.

### 4.2 Architektúra systému

Na základe požiadaviek uvedených v kapitole 4.1, bola vytvorená bloková schéma 4.1, slúžiaca na prvotnú definíciu systému. Schéma názorne ilustruje nevyhnutné funkčné celky a toky dát definujúce smer prúdenia informácií medzi týmito blokmi.

Tok označený hrubou prerušovanou čiarou znázorňuje analógový signál smerujúci z optického sensorického systému do prijímača signálu. Po tomto bloku je systémom spracovávaný už len digitálny signál reprezentovaný neprerušovanými čiarami. Tenké prerušované čiary znázorňujú kvázi signalizačné správy slúžiace napr. na spínanie a výmenu redundantných dát.

Návrh systému možno adekvátne rozdeliť do dvoch logických vrstiev a to do softvérovej a hardvérovej vrstvy. Od nižšej hardvérovej vrstvy je potrebný prevod analógového signálu zo senzoru do jeho digitálnej podoby. Tento krok umožňujú prvky nazývané analógovo digitálne prevodníky, ktoré prostredníctvom procesu pozostávajúceho zo vzorkovania, kvantovania a kódovania dokážu túto funkciu zabezpečiť. Po prevode spojitého signálu do číselnej postupnosti je nutné v rámci systému zabezpečiť dostatočné prostriedky na prácu s relatívne vysokým množstvom dát [44].



Obr. 4.1: Bloková schéma návrhu architektúry systému.

V rámci softvérovej vrstvy, je pre dosiahnutie optimálnych výsledkov dôležité použiť technológie pasívne nevyužívajúce veľké množstvo dostupnej kapacity hardvéru.

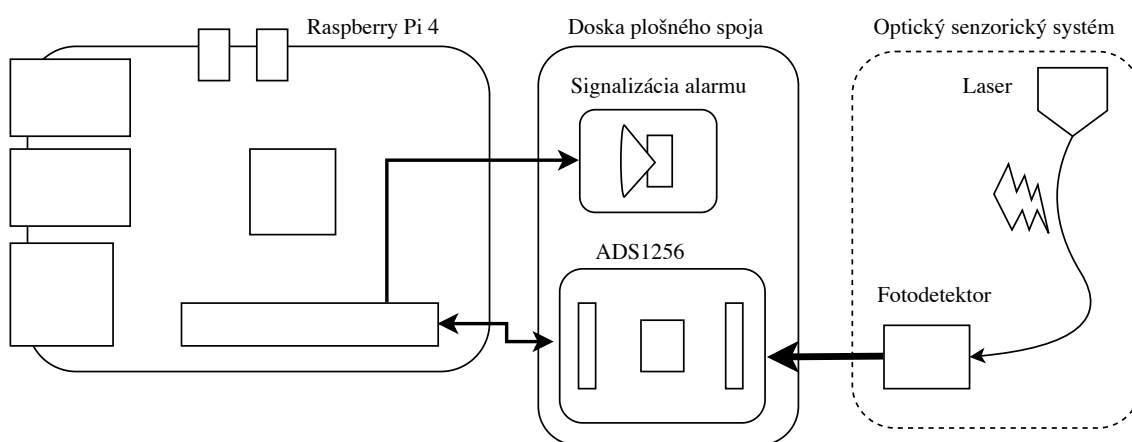
## 5 Hardvérová architektúra

Nevyhnutnou súčasťou každého zariadenia je spoľahlivá fyzická vrstva, ktorá zaručí základnú funkčnosť a konektivitu k potrebným perifériám. V rámci tejto kapitoly je detailne rozoberaná téma výberu jednotlivých komponentov, ich vzájomného prepojenia a návrhu konštrukcie slúžiacej na zvýšenie odolnosti voči vonkajším vplyvom a manipuláciám.

Na základe blokovej schémy 4.1, ktorá ilustruje návrh architektúry systému, je potrebné zabezpečiť niekoľko hardvérových komponentov.

- Platformu poskytujúcu výpočtový výkon, ktorá by bola hostujúcim prvkom pre bloky definujúce základnú funkčnosť zabezpečovacieho systému.
- Analógovo digitálny prevodník konvertujúci spojitý signál do digitálnej formy zrozumiteľnej pre platformu.
- Pasívne súčiastky slúžiace na prepojenie prípadne signalizáciu alarmov.
- Plošný spoj slúžiaci na centralizáciu týchto komponentov.
- Vhodný kryt poskytujúci chladenie a ochranu.

Pri výbere vhodných dielov boli do úvahy brané hlavné faktory ako cena, komplexnosť riešenia, náročnosť implementácie potrebnej funkčnality a dostupnosť na trhu.



Obr. 5.1: Hardvérová architektúra zabezpečovacieho systému.

### 5.1 Výber platformy

V rámci výberu vyhovujúcej platformy bolo dôležité dbať na výkonnostné a celkové schopnosti hľadanej jednotky. Prvou myšlienkou bolo splnenie cieľov za využitia programovateľných mikročipov zo série ATMEGA od spoločnosti Microchip

Technology. Z dôvodu obmedzení, ktoré toto riešenie ponúka v závislosti od sofistikovanosti vyhodnocovania alarmov a samotnej výkonnosti mikročipu bolo nutné zvoliť iný prístup.

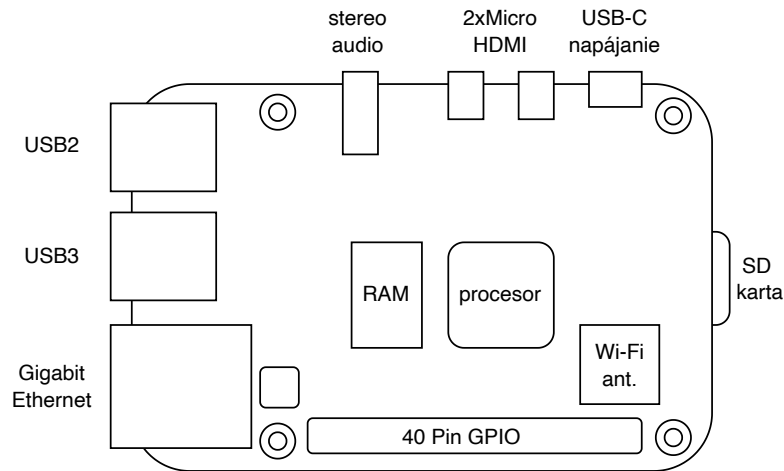
Výhodným sa ukázalo použitie celosvetovo obľubovaného jednodoskového mini počítača Raspberry Pi, ktorý podporuje vývoj aplikácií vo vyššej miere abstrakcie a rovnako tak poskytuje v nadmernej miere aj potrebný výkon. Aj keď cenovo toto riešenie niekoľko násobne presahuje alternatívu s mikročipom, tak čas investovaný do vývoja obdobnej funkcionality za pomoci programovacieho jazyka C++, používaného v kontexte mikročipov a mikrokontrolérov, by sa negatívne odzrkadlil na celkových nákladoch.

### 5.1.1 Raspberry Pi

Raspberry Pi je kompaktný jednodoskový počítač, ktorý si svoju popularitu na rozdiel od FPGA (Field Programmable Gate Array) alebo Arduino získal vďaka možnosti prevádzky operačného systému (OS). Firma Raspberry Pi Ltd na svojich stránkach poskytuje k platforme optimalizovaný Raspberry Pi OS, ktorý je založený na distribúcií Debian. Keďže OS pochádza z rodiny Linux, umožňuje použitie veľkého množstva balíčkov zabezpečujúcich kompatibilitu v širokom spektre technológií využívaných pri vývoji moderných aplikácií. Najrozšírenejším podporovaným programovacím jazykom je Python, ktorý je v základe predinštalovaný a v rámci OS sú k nemu dostupné aj dve vývojové prostredia Thonny a Geanny [43].

Obsluhovať zariadenie je možné tromi základnými spôsobmi a to terminálom pomocou Secure Shell (SSH) protokolu, vzdialeným prístupom Remote Desktop Protocol (RDP) alebo Virtual Network Computing (VNC) a fyzicky využitím klávesnice, myšky a obrazovky [43].

Raspberry Pi disponuje štvorjadrovým procesorom spolupracujúcim s RAM dostupnej vo veľkosti jeden, dva, štyri alebo osem Gb. Pripojenie do siete zabezpečuje dvomi spôsobmi a to pomocou Ethernet kábla alebo Wireless Fidelity (Wi-Fi). Napájanie zastrešuje zdroj s výkonom 20,4 W pripojený do dosky plošného spoja (DPS) pomocou USB-C konektoru. Raspberry Pi obsahuje aj dva Micro HDMI konektory na prepojenie so zobrazovacími jednotkami v rozlíšení 4K. Najdôležitejšou súčasťou je však vyvedenie štyridsiatich General Purpose Input Output (GPIO) pinov poskytujúcich obojsmerné rozhranie pre komunikáciu pomocou Serial Peripheral Interface (SPI), Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART), Inter Integrated Circuit (I2C) alebo na prácu s inými digitálnymi komponentami [43].



Obr. 5.2: Jednodoskový počítač Raspberry Pi 4 Model B [43].

## 5.2 Výber AD prevodníku

Analógovo digitálne (AD) prevodníky vo svojej podstate slúžia na prevod spojitého signálu do digitálneho tvaru. Tento krok rozširuje možnosti spracovania signálu a umožňuje digitálnym výpočtovým jednotkám s ním ďalej manipulovať [44].

AD prevodníky sa v základe rozlišujú podľa dvoch primárnych parametrov, ktorými sú vzorkovacia frekvencia a bitové rozlíšenie. V reálnom svete je však potrebné dbať aj na parametre podstatné z vývojového hľadiska ako napr. počet vstupných kanálov, ponúkané komunikačné rozhranie a veľmi dôležitý ukazovateľ cena. V prípade rýchlosti vzorkovania a bitového rozlíšenia vo všeobecnosti platí, že čím je hodnota týchto parametrov vyššia, tým narastá aj cena [44].

Z vyššie spomenutého vyplýva, že najväčšou výzvou je výber prevodníku s adekvátnymi parametrami, pričom by sa aj z ekonomického hľadiska javil ako výhodný. Prevodníky, ktoré vykazovali priaznivé výsledky v pomere výkonu ku cene sú obsiahnuté v rámci tab 5.1.

Tab. 5.1: Porovnanie analógovo digitálnych prevodníkov [45, 46, 47].

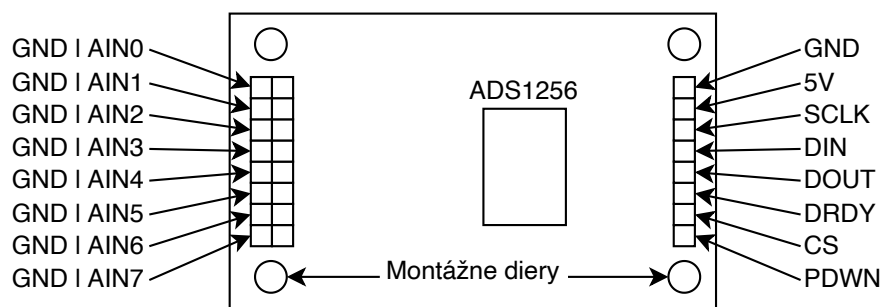
| Názov   | Bitové rozlíšenie [b] | Vzorkovacia frekvencia [kHz] | Počet kanálov | Komunikačné rozhranie | Cena [€] |
|---------|-----------------------|------------------------------|---------------|-----------------------|----------|
| ADS1263 | 32                    | 38,4                         | 10            | SPI                   | 49,40    |
| ADS1256 | 24                    | 30                           | 8             | SPI                   | 21,75    |
| PCF8591 | 8                     | 11,1                         | 4             | I2C                   | 2,60     |
| ADS1015 | 12                    | 3,3                          | 2             | I2C                   | 4,70     |



### 5.2.1 ADS1256

Na základe tabuľky bol vybraný prevodník ADS1256, ktorý ponúka 24 bitové rozlíšenie a vzorkovaciu frekvenciu 30 kHz. Jeho úspech ovplyvnila aj prítomnosť komunikačného rozhrania SPI, ktorého maximálna rýchlosť je podľa zdroja [48] definovaná maximálnou rýchlosťou zúčastnených uzlov komunikácie. Tento fakt bol v našom prípade žiadúci, keďže bolo eliminované rýchlostné obmedzenie zo strany komunikačného protokolu.

Prevedenie dostupné na internetovom obchode [46] je konštruované ako samostatný plošný spoj obsahujúci všetky potrebné radiacie okruhy. Jednotlivé výstupy samotného prevodníku sú vyvedené na štandardné GPIO piny v prevedení samec, čím je zaručené väčšie pohodlie pri zapojovaní.



Obr. 5.3: Analógovo digitálny prevodník ADS1256 [46].

### 5.3 Doska plošného spoja

Pri vývoji zabezpečovacieho systému bol v rámci vývoja postavený prototyp na nepájavom poli, ktorý v počiatočných štádiách zaručoval schopnosť jednoducho meniť zapojenie súčiastok podľa potreby. Z dôvodu kompletizácie práce do výslednej podoby bolo nutné otestované zapojenie pretaviť do samostatného plošného spoja, ktorý by efektívne plnil funkciu prepojovacieho média. Nad rámec prepojenia jednotlivých komponentov, tento prístup zvyšuje aj celkovú odolnosť produktu a jeho kompaktnosť.

Výhotovenie plošného spoja možno rozdeliť do štyroch základných krokov:

- návrh rozloženia jednotlivých súčiastok na plošnom spoji,
- vyleptanie návrhu na dosku plošného spoja,
- vyvrtanie dier a osadenie jednotlivých súčiastok,
- otestovanie funkcionality.

Jednotlivé súčiastky obsiahnuté v tab.5.2 nespádali pod náročnejšie výberové kritéria, ale boli vybrané na základe dostupnosti a ich poskytovanej funkcionality.

Tab. 5.2: Zoznam použitých súčiastok na vyhotovenie dosky plošného spoju [50].

| Názov   | Počet | Cena [€/ks] |
|---|-------|-------------|
| GOLDEN LOCH 1436D-6252A1-50<br>koaxiálny SMA konektor | 2     | 1,65        |
| KLS MLW10A konektor pre ploché káble do DPS 90°       | 1     | 0,18        |
| KLS PSH02-02PG konektor so zámkom                     | 1     | 0,08        |
| CONNFLY BL110G-V8.5 dutinková lišta 1 × 10 pin        | 3     | 0,30        |
| KINGSTATE KPEG242 piezobzučiac                        | 2     | 1,57        |
| BRIGHT LED BL-B4634 LED 5mm, červená                  | 2     | 0,16        |
| 0805 SMD 150R 151 rezistor                            | 2     | 0,02        |
| BL220G-V8.0 dutinková lišta 2 × 20 pin                | 1     | 0,35        |
| KLS AWG28-10H plochý viacžilový kábel                 | 1     | 0,55        |

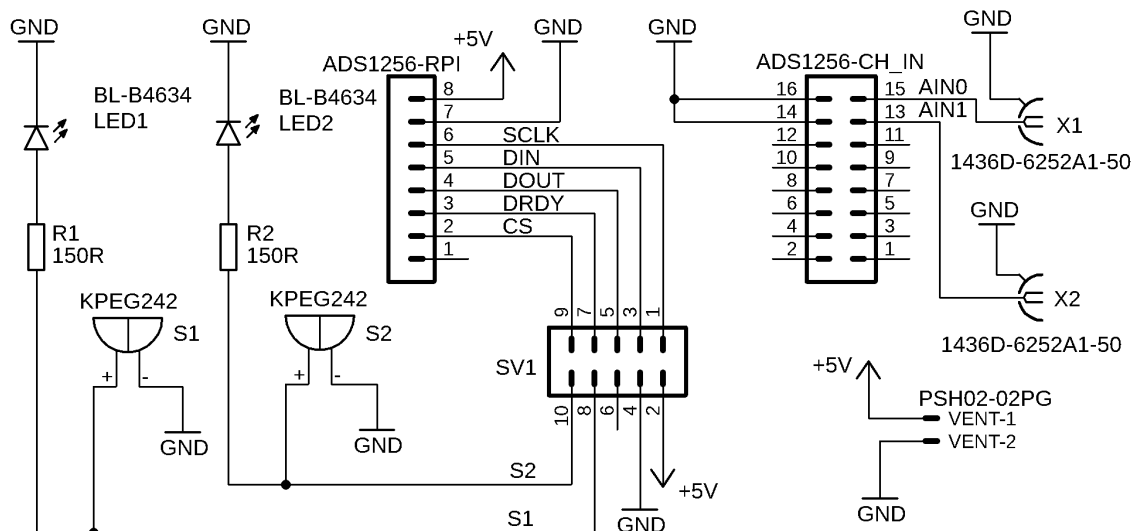
Postupujúc smerom od výstupu vláknového senzorického systému bolo potrebné použiť dva koaxiálne SMA konektory, ktoré zabezpečujú prepojenie fotodetektorov s DPS. Spôsob uchytenia a pripojenia AD prevodníku poskytuje trojica dutinkových lišt, ktoré bolo potrebné skratiť do usporiadania 1 × 8 z dôvodu výstupov AD prevodníku. DPS rovnako tak obsahuje aj signalizačnú sekciu pozostávajúcu z dvoch červených LED diód a dvoch bzučiacov, ktoré slúžia na upozornenie o prítomnosti narušiteľa samostatne pre každý kanál. Prepojenie s platformou zastrešuje desať žilový plochý kábel z oboch strán naspájkovaný do potrebnej formácie.

### 5.3.1 Návrh

Na návrh spojov bol použitý dizajnovací softvér EAGLE od spoločnosti Autodesk. Softvér poskytuje veľké množstvo vopred definovaných súčiastok, prípadne možnosť vytvárania a importovania si vlastných. Možnosť automatického prepojenia jednotlivých súčiastok na základe schémy zapojenia a funkcionality automatického prepojavania radikálne znižuje čas strávený pri kompletizácii [49]. Schéma zapojenia, príp. výsledné rozloženie jednotlivých ciest, inšpirované funkčným prototypom, je ilustrované na obrázku 5.4, resp. 5.5.

### 5.3.2 Výroba

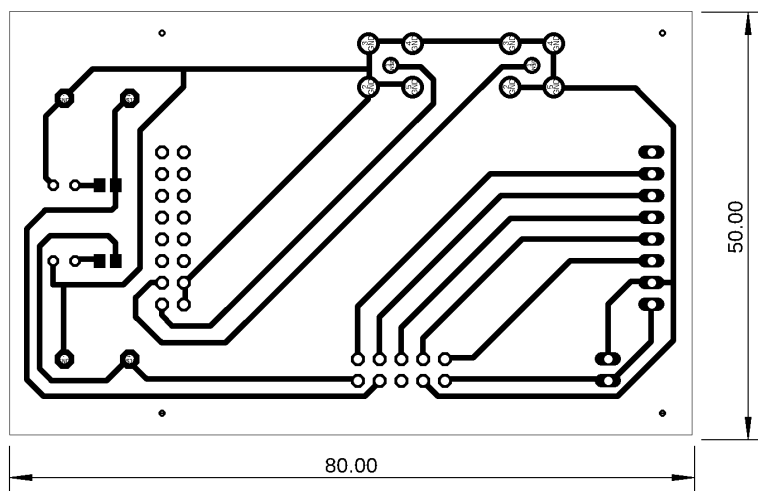
Po navrhnutí bolo schému potrebné fyzicky vyleptať na DPS. Použitá DPS obsahuje dielektrikum z materiálu FR4, na ktorom je natiahnutá tenká vrstva medi s fotosenzitívnou úpravou. V internetovom obchode [47] sa táto trojkombinácia predáva



Obr. 5.4: Schéma zapojenia plošného spoja.

pod názvom fotocuprextit. Je potrebné poznamenať, že vyhotovenie DPS bolo zrealizované v domácich podmienkach z dôvodu vysokej dodacej lehoty jednotlivých výrobcov poskytujúcich tieto služby.

V prvom kroku bolo potrebné vytlačenie návrhu pomocou laserovej tlačiarne na pauzovací papier. DPS zo strany, kde je nanosená foto-senzitívna vrstva obsahuje chrániacu fóliu, ktorá zabraňuje aktivácii vrstvy z denného svetla. Po odstránení fólie sa vytlačený vzor priloží na stranu DPS s medenou vrstvou a nastaví podľa potreby. Následne pomocou sklenenej platničky je v tejto polohe pauzovací papier s vytlačeným vzorom zafixovaný.



Obr. 5.5: Návrh vedenia trás na doske plošného spoja.

Osvietením DPS ultrafialovým žiarením (UV) je zabezpečená aktivácia časti fotosenzitívnej vrstvy, ktorá nie je chránená nami vytvorenou bariérou v podobe vytlačeného vzoru. Po troch minútach osvecovania je dôležitým krokom odstránenie fixačného sklíčka spolu s pauzovacím papierom a ponorenie DPS do roztoku hydroxidu sodného (vývojka) na jeden a pol minúty. Vývojka zabezpečí rozpustenie aktivovanej fotocitlivej vrstvy, ktorá bráni leptadlu interagovať s medenou vrstvou. Po vyvolaní je prúdom vody DPS zbavená od vývojky a pripravená na leptanie.

Na leptanie medi bol v našom prípade použitý leptací roztok pozostávajúci z per-síranu sodného. Z predchádzajúcich pokusov bolo odsledované, že optimálna doba ponorenia je osemnásť minút pri teplote 40 až 45 °C. Po vyleptaní nepotrebné medi je DPS opláchnuté pod tečúcou vodou a znovu vystavené UV žiareniu a vyvolané. Týmto je zabezpečené odstránenie fotosenzitívnej vrstvy z povrchu vyleptaných cestičiek. Po opätovnom opláchnutí a vysušení bola DPS zakonzervovaná pomocou FLUX spreju, ktorý chráni med pred oxidáciou a rovnako tak slúži ako tavivo [50].

Po vyvrtaní dier a naspájkovaní jednotlivých súčiastok bola na plošný spoj znovu nanosená ochrana v podobe polyuretánového laku. Osadenú DPS v takomto štádiu ostávalo otestovať za pomoci multimetra s funkciou testu spojitosti vedenia, pri ktorom sa nevyskytli žiadne problémy.



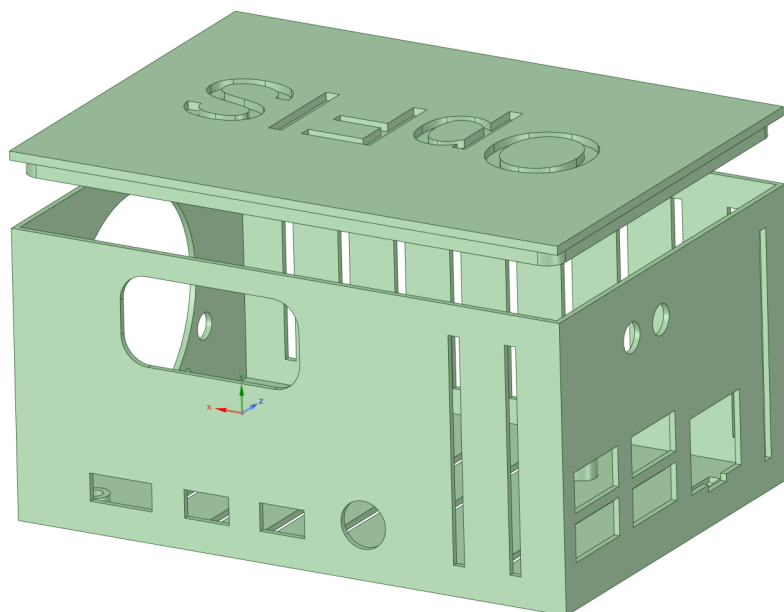
Obr. 5.6: Doska plošného spoju prepojená s platformou Raspberry Pi 4.

## 5.4 Kryt zariadenia

Na zvýšenie odolnosti, kompaktnosti a efektivity zariadenia bola pozornosť venovaná vytvoreniu krytu zariadenia použitím technológie 3D modelovania a 3D tlače. Návrh spočíval vo vytvorení krytu, ktorý by zvýšil odolnosť vytvoreného zariadenia, vid' obr. 5.6 pri manipulácii a efektívne zabezpečoval chladenie procesoru platformy. V neposlednom rade by mal kryt splňovať aj požiadavky estetického charakteru.

Modelovanie krytu bolo sprostredkované za využitia modelovacieho softvéru americkej spoločnosti Ansys s názvom SpaceClaim. Softvér sa zameriava na jednoduchosť použitia a minimalizácii času stráveného pri modelovaní. Poskytovaním exportu do viacerých formátov zaručuje schopnosť interagovať s ostatnými softvérmi napr. na renderovanie modelov alebo samotnú 3D tlač [51].

Výsledná verzia krytu bola navrhnutá tak, aby poskytovala prístup k všetkým bočným konektorom, ktorými Raspberry Pi 4 disponuje. Týmto bola zaručená možnosť napájania, pripojenia zariadenia do komunikačnej siete, príp. vykonávania servisných úkonov v rámci OS platformy. Rovnako tak bolo dôležité vyvedenie koaxiálnych SMA konektorov potrebných na pripojenie fotodetektorov a LED diód pre poskytnutie vizuálneho kontaktu počas alarmu.



Obr. 5.7: Model krytu zariadenia zabezpečovacieho systému.

Z dôvodu nadmerného zvyšovania teploty procesoru pri záťaži bolo implementované aktívne chladenie pomocou ventilátora o priemere 40 mm v kombinácii s výdychmi, ktoré zabezpečujú efektívny odtok teplého vzduchu z vnútra krytu. Zariadenie a ventilátor je pevne uchytený ku krytu za použitia štyroch imbusových skrutiek

potrebnej dĺžky, čím bola docielená aj väčšia prémiovosť výsledného produktu, keďže sa v rámci interiéru produktu nič voľne nepohybuje a nehrká.



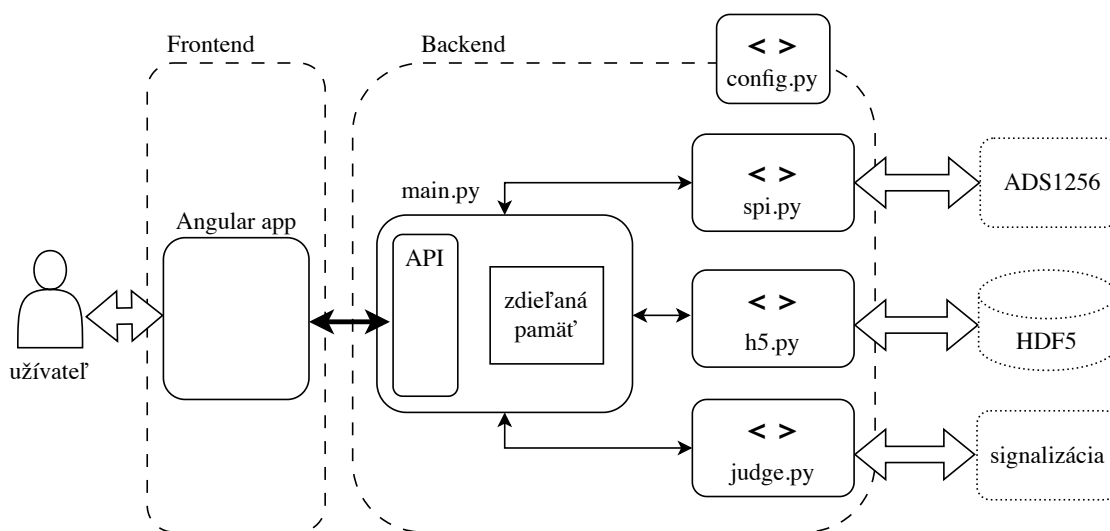
Obr. 5.8: Výsledný hardvér zabezpečovacieho systému.

## 6 Softvérová architektúra

V rámci softvérovej časti práce bola základná myšlienka vytvorenie aplikácie, ktorá by poskytovala užívateľovi jednoduchý a intuitívny spôsob práce so zariadením. Pre naplnenie tohto cieľu bola zvolená cesta vytvorenia dvoch samostatných aplikácií, ktoré medzi sebou komunikujú spôsobom žiadosť–odpoveď (angl. request–response). V anglickej terminológii sa jednotlivé aplikácie najčastejšie označujú ako

- **backend**, ktorý poskytuje základnú funkčnosť systému a
- **frontend**, ktorý slúži pre užívateľa ako vstupno–výstupné rozhranie [52].

Ilustrácia 6.1 zobrazuje celkovú architektúru zabezpečovacieho systému, ktorá je rozdelená do dvoch spomínaných častí backend a frontend. V nasledujúcich kapitolách bude pozornosť venovaná objasneniu ich základného princípu fungovania a vzájomnej komunikácie.



Obr. 6.1: Softvérová architektúra zabezpečovacieho systému.

### 6.1 Backend

Ako už aj bolo spomínané v úvode predchádzajúcej kapitoly, backend je kvázi serverová časť softvéru, ktorá zaručuje všeobecnú funkčnosť. Úlohou backendu je v prípade nášho zabezpečovacieho systému spravovanie výmeny informácií s AD prevodníkom, ukladanie ich do databázy, vyhodnocovanie alarmov zo zozbieraných dát a poskytovanie informácií aplikácii frontendu.

Keďže platforma natívne podporuje programovací jazyk Python, bola táto možnosť využitá pre vývoj backendu našej aplikácie. Veľkou výhodou Pythonu je široké množstvo sťahovateľných balíčkov príp. modulov (angl. packages, resp. modules),

ktoré poskytujú funkčné rozhranie pre prácu s rôznymi technológiami. V prípade práce s balíčkami nie je nutná detailná znalosť používanej technológie, čo skraca čas potrebný na vývoj.

Z obr. 6.1 je zrejmé, že backend pozostáva zo štyroch základných súborov:

- `main.py`,
- `spi.py`,
- `h5.py`,
- `judge.py`.

A jedného konfiguračného súboru, ktorý poskytuje informácie o dĺžke okna, číslach GPIO pinov a základných parametroch komunikácie SPI protokolom

- `config.py`.

Základný princíp aplikácie je založený na asynchronicite programu, kedy jednotlivé časti bežia nezávislé na sebe. Na základe tohto dokáže aplikácia súbežne čítať dáta z prevodníku, ukladať ich a zároveň vyhodnocovať. Implementáciu uľahčila existencia balíčku multiprocessing, ktorá umožnila medziprocesovú výmenu dát a funkcia frameworku FastAPI s názvom Background Tasks. Background Tasks umožňujú neblokovať beh API počas vybavovania žiadostí za využitia asynchrónneho prístupu, ktorý pre danú úlohu vytvára nový proces. Keďže proces zaniká až v momente kompletného vybavenia žiadosti, bol tento spôsob použitý na hostovanie procesov čítania dát z prevodníku, ich ukladanie a vyhodnocovanie[59].

### 6.1.1 Zber dát

Pre potreby obsluhy AD prevodníku ADS1256, ktorý disponuje komunikačným rozhraním SPI bol vytvorený súbor `spi.py`. Súbor aktívne implementuje modul `spidev`, ktorý čiastočne prináša schopnosť komunikácie pomocou protokolu SPI.

#### Protokol SPI

Komunikačný protokol SPI sa aktívne využíva v oblastiach komunikácie medzi viacerými mikrokontrolérmi. V porovnaní so štandardmi ako USB alebo Ethernet nedosahuje tak vysoké prenosové rýchlosti, ale zato je jeho výhodou jednoduchosť a nízke systémové požiadavky [53].

Komunikácia zúčastnených uzlov prebieha spôsobom master–slave, kde master je riadiace zariadenie, v našom prípade to je Raspberry Pi a slave, teda AD prevodník prijíma inštrukcie, ktoré určujú jeho výsledné správanie. Protokol natívne implementuje možnosť zaradenia viacerých slave zariadení k jednému mastrovi [53, 54].

SPI pre zaručenie výmeny informácie definuje niekoľko základných signálov:

- **MOSI** (Master Output/Slave Input) na prenos dát v smere od master do slave,



- **MISO** (Master Input/Slave Output) na prenos dát v smere od slave do master,
- **SCLK** (Clock) slúžiaci na synchronizáciu zúčastnených uzlov,
- **CS** (Chip Select), ktorý umožňuje výber slave zariadenia v prípade systému s viacerými slave zariadeniami [53, 54].

V rámci komunikácie s AD prevodníkom ADS1256 sa používa nad rámec základných aj signál **DRDY** (Data Ready), ktorým slave informuje master zariadenie o dostupnosti nových dát na zaslanie [55].

### Nastavenie prevodníku

Požadované správanie AD prevodníku sa zabezpečuje nastavením množiny riadiacich registrov, ktorých adresy sú označované vo forme hexadecimálneho čísla. V rámci vypracovania boli najčastejšie používané registre

- MUX (0x01) primárne slúžiaci na nastavenie, z ktorého analógového vstupu prevodníku chceme dáta čítať a
- DRATE (0x03), ktorým možno priamo ovplyvňovať vzorkovaciu frekvenciu prevodníku [55].

Na riadenie alebo získavanie stavu prevodníku definuje dátový hárok [55] zoznam príkazov, pričom použité v rámci implementácie sú vypísané v tab. 6.1. Potrebné je rovnako tak poznamenať, že daný dokument obsahuje detailný návod na prácu so zariadením.

Tab. 6.1: Zoznam použitých príkazov pre prácu s AD prevodníkom ADS1256 [55].

| Príkaz | Popis                          | Prvý príkazový bajt | Druhý príkazový bajt |
|--------|--------------------------------|---------------------|----------------------|
| SYNC   | Synchronizuje AD prevod        | 1111 1100 (FCh)     |                      |
| WAKEUP | Dokončí synchronizáciu         | 1111 1111 (FFh)     |                      |
| RREG   | Prečíta hodnotu registra rrr   | 0001 rrrr (1xh)     | 0000 nnnn            |
| WREG   | Zapíše hodnotu do registra rrr | 0101 rrrr (5xh)     | 0000 nnnn            |
| RDATA  | Prečíta dáta                   | 0000 0001 (01h)     |                      |
| RDATAc | Spustí spojité čítanie dát     | 0000 0011 (03h)     |                      |
| SDATAc | Zastaví spojité čítanie dát    | 0000 1111 (0Fh)     |                      |
| RESET  | Reštartuje prevodník           | 1111 1110 (FEh)     |                      |

Aby bol prevodník schopný posielat správne digitálne dáta svojmu riadiacemu prvku, je nutné nastaviť MUX register na potrebnú hodnotu. V prvom rade je základom priniesť hodnotu signálu Chip Select (CS) do nízkej úrovne. Po uskutočnení tohto kroku nasleduje zaslanie príkazu WREG, kde pomocou operácie OR zlúčime

daný príkaz s adresou registra do potrebnej podoby, vytvoríme transakciu a uvedieme CS naspäť do vysokej úrovne [55].

Pre príklad, sled príkazov na zápis hodnoty 0x08 do registra MUX s adresou 0x01 by vyzeral 0x51 → 0x00 → 0x08, kde prvý príkaz 0x51 definuje zápis do registra MUX, druhý príkaz 0x00 definuje koľko bajtov má byť zapísaných a 0x08 vyjadruje hodnotu, ktorú požadujeme zapísať. Funkcia spôsobilá zapisovania do registra je zobrazená vo výpise 6.1. Obdobným spôsobom funguje aj proces čítania registrov a reštart zariadenia do pôvodného továrenského nastavenia.

Výpis 6.1: Výpis funkcie `write_register`.

```
def write_register(self, address, value):
    self.cs_low()
    self.spi.xfer2([0x50 | address, 0x00, value])
    self.cs_high()

    return self.read_register(address)
```

## Čítanie dát

Na nepretržité čítanie dát je definovaný príkaz `RDATAC`. Tento príkaz spôsobí, že prevodník začne poskytovať dáta zo vstupu definovaného registrom MUX vo frekvencií, ktorá je odvodená z hodnoty registra `DRATE`. Avšak v prípade čítania dát z viacerých analógových vstupov simultánne je potrebné použiť techniku multiplexovania. Základná myšlienka spočíva v cyklickom prepisovaní hodnoty MUX registra a čítaní aktuálnej hodnoty v dátovom buffri prevodníku.

Funkcia `read_mux_2ch_sd()` vo for cykle zapíše do registra MUX hodnotu `AIN0`, príp. `AIN1`, následne synchronizuje AD prevod a zašle príkaz s 0x01 čo zabezpečí vyvolanie dát do buffru. Prenesenie dát do platformy je zabezpečené pomocou funkcie `readbytes()` poskytovanej modulom `spidev`.

Funkcia `readbytes()` vracia pole hodnôt jednotlivých bajtov, ktoré je pomocou bitového posunu transformované do výsledného decimálneho čísla. V prípade ak je bit s najväčšou váhou rovný jednej je potrebné toto číslo potrebné vyjadriť ako záporné. Výsledné číslo je následne porovnané s jeho predchádzajúcou hodnotou vynásobenou zadaným koeficientom, ktorý slúži na čiastočnú elimináciu anomálií, ktoré vznikli pri prevode z neznámych dôvodov. Upravená hodnota je následne pridaná do pola `gth_data[]`.

Toto pole primárne slúži ako buffer o veľkosti definovanej v súbore `config.py`, ktorá bola na základe vlastností chôdze definovaná na hodnotu 2000, čo teoreticky interpretuje signál o dĺžke 2s pri frekvencií vzorkovania 1000 SPS. V momente naplnenia bufferu je pole zapísané do zdieľanej pamäte, ktorá slúži k viacnásobnému

prístupu k oknu dát z viacerých miest programu. Po zapísaní dát je nastavený re-  
ady\_event na hodnotu True. Eventy boli použité na komunikáciu medzi jednotlivými  
procesmi a pochádzajú z rovnakého balíčku multiprocessing ako zdieľaná pamäť.

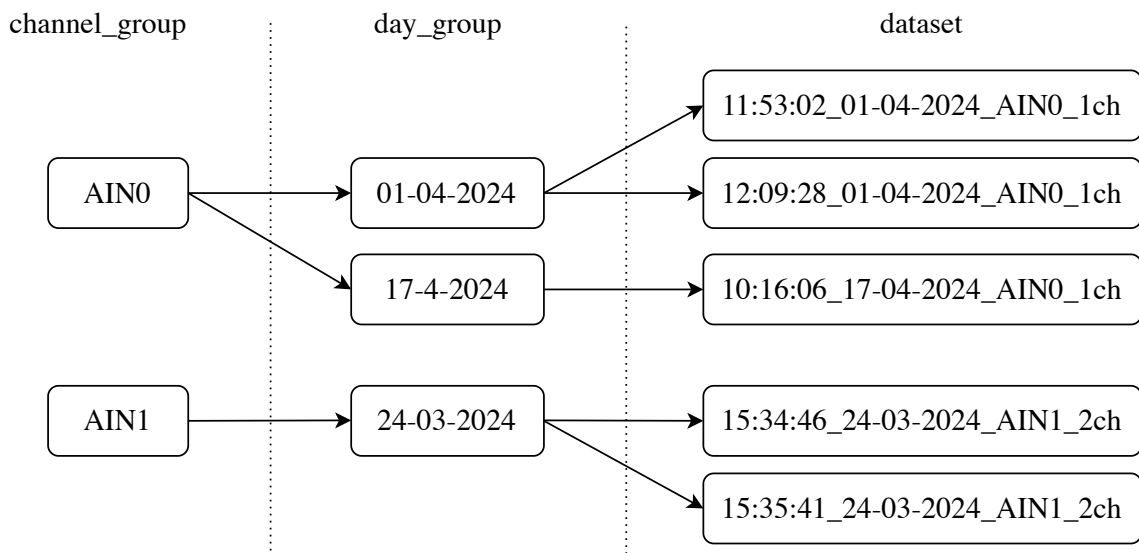
Čítaním dát z dvoch kanálov bolo odsledované, že zvýšená réžia spôsobená pre-  
pisovaním registra sa negatívne odzrkadlila na spomalení čítania a nedosahovaní  
teoretického počtu vzoriek za sekundu.

### 6.1.2 Ukladanie dát

Na základe skúseností nadobudnutých v rámci riešenia bakalárskej práce [56], bol  
na ukladanie dát použitý formát HDF5. Výhodou formátu je možnosť ukladania  
a rýchleho čítania veľkého množstva dát. Štruktúra ukladania dát je inšpirovaná  
súborovým systémom OS, čím definuje prvky

- **dataset** obsahujúci samotné dáta
- **skupina** (angl. group), ktorá predstavuje adresár a umožňuje uchovávať ďalšie  
skupiny alebo datasety [57].

Na implementáciu ukladania dát v spomínanom formáte bol použitý modul h5py,  
ktorý poskytuje kompletnú sadu funkcií na prácu s touto technológiou. Hierarchia  
databázového priestoru bola navrhnutá vo forme zobrazenej v obr. 6.2, kde chan-  
nel\_group oddeľuje dáta jednotlivých analógových vstupov a day\_group poskytuje  
prehľad dát podľa dátumu merania. Názov každého datasetu je generovaný unikátne,  
aby aj čisto z jeho názvu bolo možné určiť pôvod meraných dát.



Obr. 6.2: Príklad databázovej štruktúry súboru OFS.h5.

Program v rámci súboru h5.py, vyčkáva vo while cykle na zmenu hodnoty re-  
ady\_event na True, kedy pristúpi k obsahu zdieľanej pamäte a dáta uloží do data-

setu. Dôležité je poznamenať, že pri pridávaní dát do datasetu je nutné manuálne zväčšiť jeho veľkosť, keďže h5py nepodporuje natívne dynamické pridávanie obsahu do datasetu. Počas vytvorenia a konca práce s dátovým súborom sú pridané atribúty

- `sample_rate`,
- `start_time`,
- `end_time`,

ktoré obsahujú prídavné informácie pre prípad neskoršej analýzy súboru.

### 6.1.3 Vyhodnocovanie dát

Pri vyhodnocovaní dát bolo nutné zabezpečiť mechanizmus proti spúšťaniu falošných alarmov spôsobených chôdzou v inej miestnosti, príp. pádom predmetu v blízkosti vlákna. Úspech teda spočíval vo vyvinutí algoritmu, ktorý by čisto spúšťal alarm len v momente pohybu osoby ponad meracie vlákno.

Prvotná implementácia vyhodnocovania pomocou priemerovania okna a porovnávania s `thresholdom` ukázala, že daná metóda je nedostačujúca. Z dôvodu kolísania signálu z pozitívnych do záporných hodnôt, priemerná hodnota efektívne neodzrkadľovala výchyľky v signále spôsobené otrasmi.

Z tohto dôvodu bolo nutné nájsť metódu, pomocou ktorej by bolo možné identifikovať variabilitu signálu. Vyhovujúci sa ukázal štatistický ukazovateľ smerodajná odchýľka, ktorej hodnota odpovedá ako sú hodnoty signálu rozložené okolo aritmetického priemeru. Výpočet smerodajnej odchýľky definuje rovnica

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6.1)$$

kde  $N$  je počet prvkov množiny,  $x_i$  je  $i$  hodnota množiny a  $\bar{x}$  je priemerná hodnota množiny [58].

Nasadením a otestovaním sa ukázalo, že použitím tejto metódy je možné s väčšou úspešnosťou determinovať udalosti spôsobené pohybom osoby v miestnosti.

Na vyhodnocovanie bola vytvorená funkcia `judge_2ch_sd()`, ktorá pracuje s dátami v zdieľanej pamäti. V momente načítania dát nového okna, funkcia implementuje logiku na výpočet jeho smerodajnej odchýľky. Vypočítaná hodnota je následne zapísaná do bufferu, ktorý uchováva hodnoty smerodajnej odchýľky posledných troch okien. Program pri vyhodnocovaní alarmu porovnáva všetky tri hodnoty bufferu s `thresholdom` a v momente, ak sú všetky hodnoty naraz väčšie, je vyvolaný proces signalizácie alarmu.

### 6.1.4 Signalizáciu alarmu

V rámci procesu signalizácie sú implementované dve metódy informovania užívateľa.

- Fyzická, ktorá spočíva v periodickom spínaní digitálneho pinu GPIO, čím je zabezpečené blikanie LED diódy a zároveň spúšťanie bzučiaku.
- Metóda eventu, kedy je zmenený stav alarmového eventu príslušného kanálu, ktorý slúži na signalizáciu vo frontendovej aplikácii, viď kapitola 6.5.

### 6.1.5 Komunikačné rozhranie

Komunikácia s okolím bola zabezpečená metódou vytvorenia webového aplikačného programovacieho rozhrania (angl. Application Programming Interface – API). Takýto prístup umožňuje komunikáciu klienta (frontend) a serveru (backend) pomocou protokolu HTTP. Na implementáciu API bol použitý framework FastAPI, ktorý narozdiel od Django alebo Flask vyniká v jednoduchosti použitia a rýchlosti vývoja. FastAPI rovnako tak natívne podporuje implementáciu websocketov, ktoré bolo nutné použiť pre prezentáciu dát v kvázi reálnom čase.

#### HTTP protokol

HyperText Transfer Protocol (HTTP) je v dnešnej dobe jeden z najpoužívanejších protokolov na prenos dát medzi klientom a webovým serverom. Jeho princíp je založený na klientom zasielaných žiadostiach na webový server, ktorý reaguje odpoveďou [60].

Protokol definuje niekoľko základných typov žiadostí ako GET, POST, PUT, DELETE a ďalšie. Pri vypracovaní boli použité len žiadosti typu

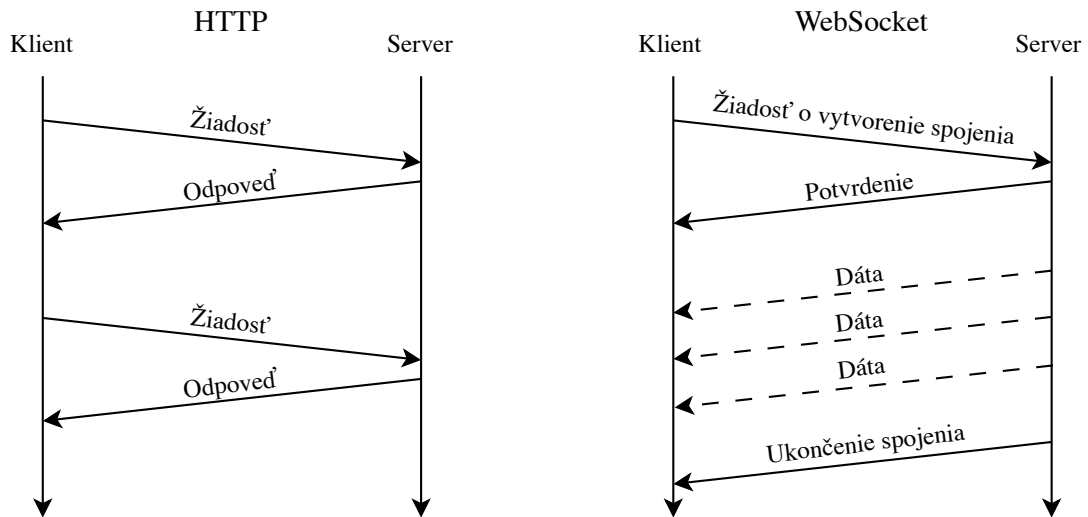
- **GET** na vyžiadanie dát zo servera a
- **POST**, ktoré slúžili predovšetkým na spúšťanie procesov [60].

Po zaslaní žiadosti obsahuje odpoveď servera nad rámec užitočných dát aj stavový kód, ktorý informuje klienta o výsledku žiadosti. HTTP stavové kódy sú interpretované ako trojciferné číslo, kde prvá cifra určuje triedu kódu a posledné dve cifry slúžia na detailnejšiu klasifikáciu výsledku odpovede. Zoznam všetkých stavových kódov protokolu HTTP je obsiahnutý v dokumentácii [60].

#### WebSocket

V momente spusteného kontinuálneho čítania dát z AD prevodníku, má server k dispozícii každé dve sekundy nové dáta, ktoré treba poskytnúť užívateľovi. Možné riešenie tohto problému by bolo periodické použitie žiadosti GET HTTP protokolu. Tento prístup však nie je najoptimálnejší a vnáša do softvéru množstvo problémov.

Efektívnejšia však bola možnosť využitia technológie WebSocket, ktorej princíp je založený na vytvorení dvojbodového spojenia platného v požadovanom časovom úseku. Počas vytvoreného spojenia server streamuje dáta klientskej aplikácii, ktorá ich následne prezentuje užívateľovi. Po ukončení spojenia jednou z komunikujúcich strán vytvorené spojenie zaniká [61].



Obr. 6.3: Porovnanie komunikácie WebSocket a HTTP [62].

### Zoznam endpointov

Aby bolo možné komunikovať so serverom pomocou HTTP žiadostí musia byť definované tzv. koncové body (angl. endpoints). Endpoint je v podstate Uniform Resource Locator (URL) adresa, pomocou ktorej možno rozlišovať požadovanú funkcionálnosť serveru. URL adresa pozostáva z IP adresy zariadenia alebo jeho doménového mena a URL cesty, ktorá by mala čo najjasnejšie popisovať danú operáciu.

Pre príklad, zaslaním GET žiadosti na URL adresu 192.168.88.28:8000/spi/read/register?address=0x01 je docieľené prečítanie hodnoty registra MUX a zaslanie jeho hodnoty vo formáte JavaScript Object Notation (JSON) v odpovedi.

Aplikácia poskytuje nasledovné endpointy:

- GET:
  - /spi/read/register?address={address} – Prečíta a vráti hodnotu registra s adresou {address}.
  - /h5/database – Vráti všetky channel\_group, vid' obr. 6.2.
  - /h5/database/{channel} – Vráti obsah {channel}.
  - /h5/database/{channel}/{day} – Vráti obsah {channel}/{day}.

- /h5/database/{channel}/{day}/{dataset} – Vrátí dáta datasetu {channel}/{day}/{dataset}.
- /events/status – Vracia stav všetkých procesov.
- POST:
  - /spi/write/register?address={address}&value={value} – Zapiše hodnotu {value} do registra {address}.
  - /spi/reset – Vyvolá reštart AD prevodíku.
  - /spi/read/data?n\_channels={n} – Zapne proces kontinuálneho čítania z {n} analógových vstupov.
  - /spi/event/terminate – Vynúti vypnutie akéhokoľvek spi procesu.
  - /h5/persist/data?n\_channels={n} – Zapne proces ukladania dát pri čítaní {n} analógových vstupov.
  - /h5/event/terminate – Vynúti vypnutie akéhokoľvek h5 procesu.
  - /judge/1ch/on – Zapne proces vyhodnocovania pre 1 kanál.
  - /judge/2ch/on – Zapne proces vyhodnocovania pre 2 kanály.
  - /judge/off – Vypne proces vyhodnocovania.
  - /alarm/off/0 – Vypne proces alarmu na kanále 0.
  - /alarm/off/1 – Vypne proces alarmu na kanále 1.
  - /alarm/off – Vypne všetky procesy alarmov.
  - /processes/off – Vypne všetky procesy spi, h5 a judge.

## 6.2 Frontend

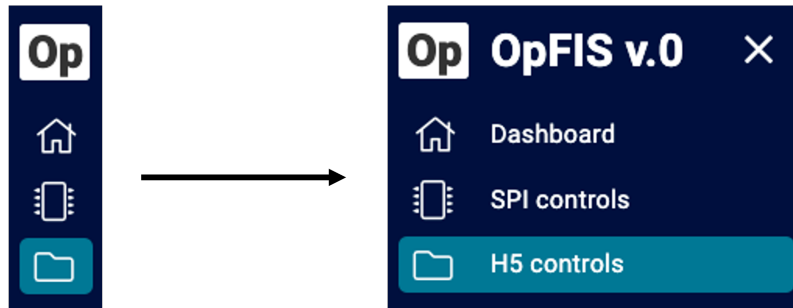
Frontendová aplikácia bola vytvorená za použitia vývojovej platformy Angular. Angular je komponentovo založený framework, kde jednotlivé komponenty slúžia ako základné stavebné bloky aplikácie. Komponenty pozostávajú primárne z troch základných súborov

- **component.html** – slúžiaci na vytvorenie štruktúry komponentu pomocou HyperText Markup Language (HTML) elementov,
- **component.css** – poskytujúci možnosť štylizácie HTML elementov pomocou Cascading Style Sheets (CSS) a
- **component.ts** – obsahujúci funkcionality daného komponentu pomocou jazyku TypeScript.

Prvé dva súbory teda slúžia na dizajnovanie vzhľadu komponentu a posledný súbor definuje funkcionality ako napr. zasielanie HTTP requestov pri stlačení tlačidla a vypísaní hodnôt z tela response na obrazovku. Výsledný vzhľad aplikácie je založený na rozmiestnení jednotlivých komponentov, ktoré medzi sebou komunikujú a vytvárajú jeden celok [63].

## 6.2.1 Štruktúra užívateľského rozhrania

Aplikácia pozostáva z troch základných okien Dashboard, SPI control panel a H5 control panel, medzi ktorými je možné sa navigovať pomocou rozbaľovacieho menu v ľavej časti obrazovky.



Obr. 6.4: Rozbaľovacie menu na navigáciu medzi oknami.

### Dashboard

Okno Dashboard poskytuje bežnému užívateľovi všetky potrebné nástroje k zabezpečeniu miestnosti. Stlačením tlačidla Secure frontendová aplikácia vykoná

- vytvorenie WebSocket spojenia,
- reštart AD prevodníku s nastavením podľa `config.py`,
- zapne proces čítania z dvoch kanálov a
- proces vyhodnocovania signálu.

Po úspešnej inicializácii by sa približne po dvoch sekundách mal priebeh signálu prezentovať do dvoch grafov nachádzajúcich sa v okne Main view, viď obr. 6.5. Podľa potreby je tlačidlom Stop umožnené celý proces vypnúť.

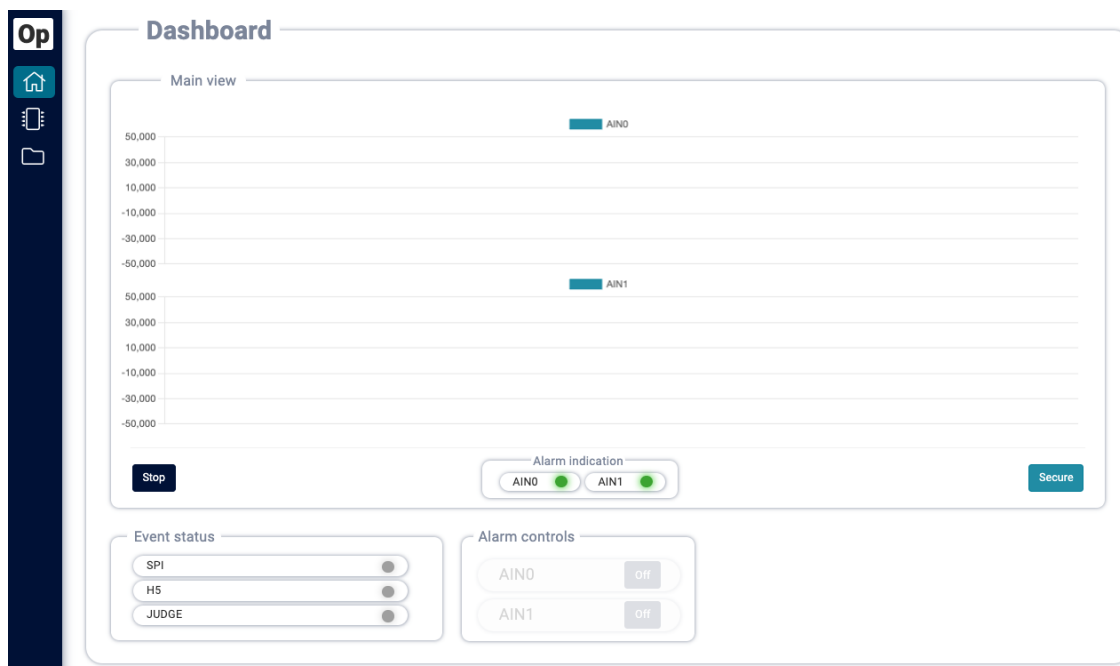
V prípade vyhodnotenia alarmu sa WebSocket spojením pošle zmenený stav eventu alarm pre daný kanál a v rámci komponentu Alarm indication rozbliká na červeno signalizáciu. Rovnako tak bunka Alarm control umožní vypnutie alarmu pomocou tlačidla off, ktoré je v bez alarmovom stave nedostupné.

Okno navyše obsahuje čisto informačný komponent Event status s vnútornými stavmi bežiacich procesov platformy.

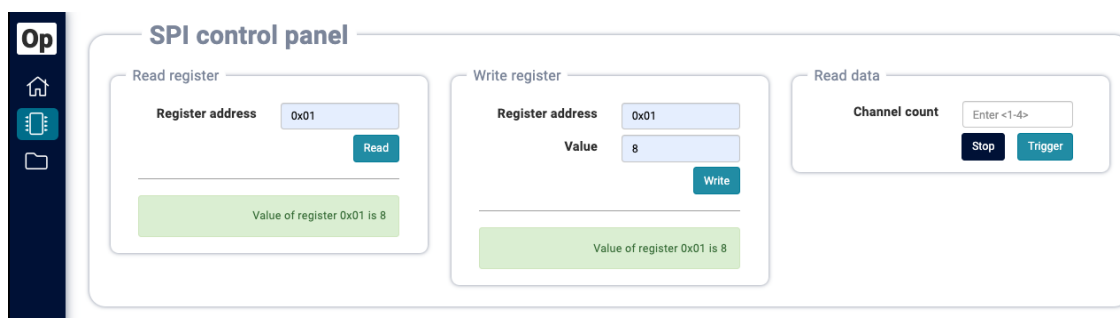
### SPI control panel

V zobrazení SPI control panel je pokročilejšiemu užívateľovi umožnené priamo zasahovať do registrov AD prevodníku a čítať ich. Na prácu s týmto oknom sú požadované základné znalosti práce s AD prevodníkom ADS1256. Pomocou komponentu Read Data je rovnako tak možné spustiť proces čítania vybraného vstupu, avšak je nutné si riadiace registre nastaviť manuálne.





Obr. 6.5: Zobrazenie okna Dashboard.



Obr. 6.6: Zobrazenie okna SPI control panel.

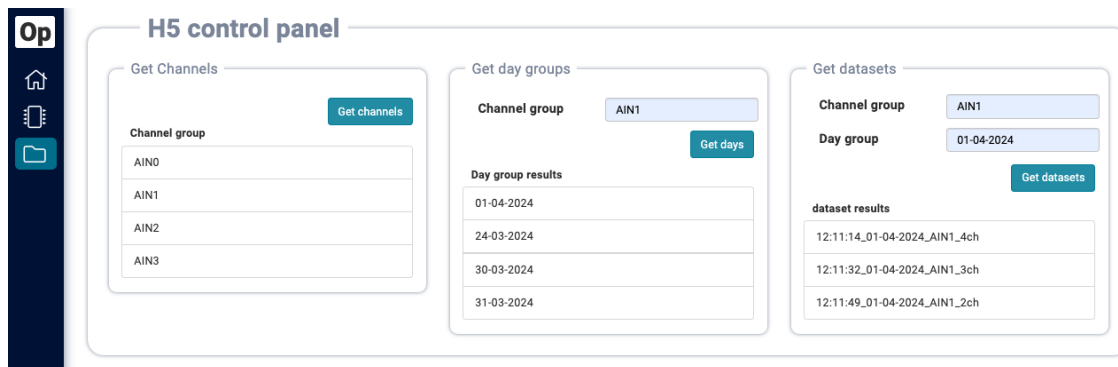
## H5 control panel

Nakoľko OS v základe nepodporujú zobrazovanie obsahu súborov s príponou .h5 je nutná inštalácia zobrazovacieho softvéru výrobcu. Pre zvýšenie pohodlia užívateľa bolo implementované rozhranie, ktoré by poskytovalo informácie o aktuálnej štruktúre súboru, bez nutnosti inštalácie tohto softvéru.

Rozloženie okna H5 control panel pozostáva z troch komponentov, kde v každom je možné zobraziť skupiny alebo datasety určitej úrovne v hierarchii, viď obr. 6.2.

### 6.2.2 Nasadenie na platformu

Na sprístupnenie užívateľského rozhrania bola zvolená metóda použitia webového serveru. Webový server umožňuje poskytovať obsah cez komunikačnú sieť, čím eli-



Obr. 6.7: Zobrazenie okna H5 control panel.

minuje povinnosť užívateľa inštalovať frontendovú aplikáciu. Po pripojení sa do rovnakej siete ako platforma je po zadaní IP adresy platformy do webového prehliadača zobrazené úvodné okno Dashboard [64].

Pre hostovanie užívateľského rozhrania bol použitý open-source webový server Apache. Pre dosiahnutie spomínanej funkcionality je potrebné pomocou príkazu `sudo apt-get install apache2` webový server Apache stiahnuť a nainštalovať. Po úspešnej inštalácii, vložení zkompilovaných súborov frontendovej aplikácie do adresáru `/var/www/html` definujeme serveru aký obsah má klientovi poskytovať. Pri zmene obsahu zložky `/var/www/html` je potrebné webový server reštartovať pomocou príkazu `sudo systemctl restart apache2` [64].

## 7 Testovacie meranie

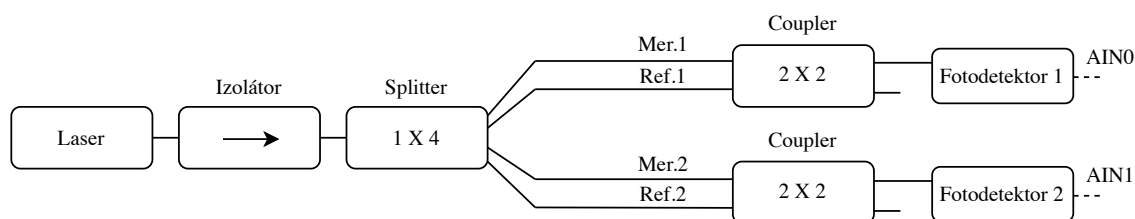
Testovanie funkčného zariadenia pozostávalo v nasimulovaní čo najreálnejších podmienok a vyhodnotení výsledkov. V rámci zadania práce bolo požadované vyhodnocovať signál čo najpresnejšie bez prítomnosti falošných alarmov. Z tohto dôvodu boli testovacie scenáre navrhnuté tak, aby bolo zaistené získanie poznatkov o limitoch vyvinutého zariadenia.

Pred finálnym otestovaním zariadenia bolo nutné vykonať niekoľko ďalších testovacích meraní, ktorými bolo zabezpečené správne nastavenie hodnôt thresholdov pre jednotlivé kanály. Testovanie zariadenia prebiehalo v priestoroch miestnosti SC 5.52 na Technickej 12 v Brne v časoch s najmenšou intenzitou pohybu osôb v okolí.

### 7.1 Zapojenie

Po konzultácií s vedúcim práce v priebehu riešenia zadania bolo dohodnuté zaznamenávať a vyhodnocovať signál z dvoch kanálov. Tomuto bolo nutné prispôbiť ako aj program tak aj senzorickú časť zariadenia.

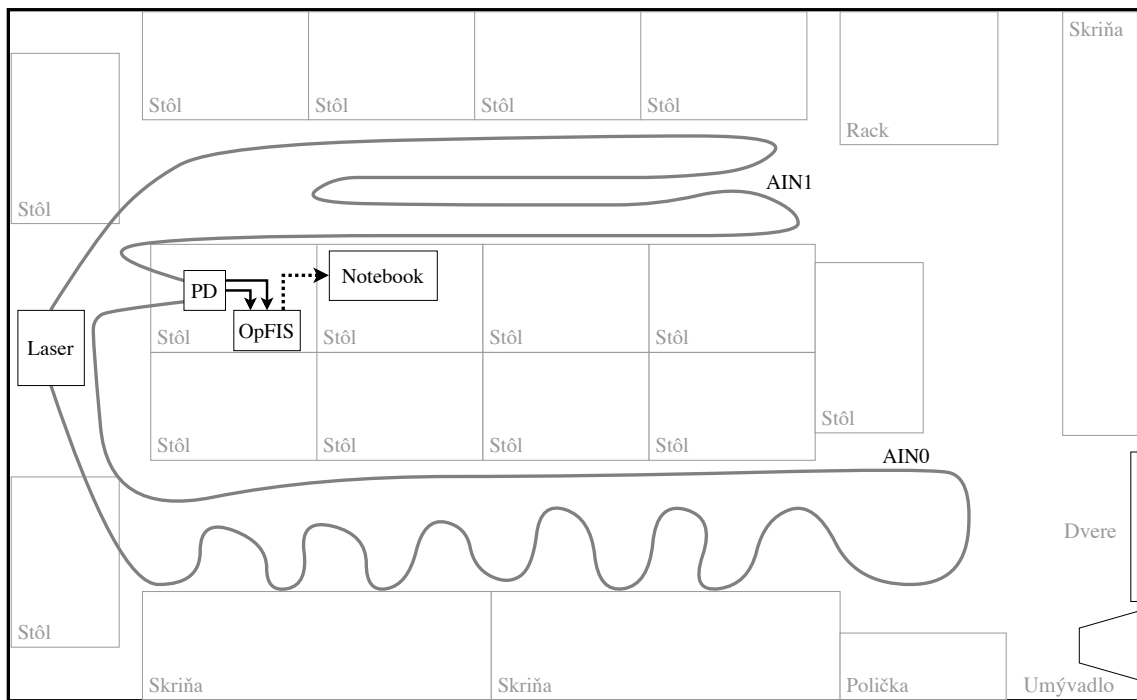
Keďže v čase vypracovania práce bol na ústave k dispozícii len jeden laser a použitie dvoch by bolo ekonomicky náročné, bolo nutné zapojenie usporiadať tak, aby s jedným laserom bolo možné napájať dve rôzne senzorické vetvy. Na základe tohto uváženia vzniklo výsledné zapojenie ilustrované v obr. 7.1.



Obr. 7.1: Bloková schéma zapojenia senzorickej jednotky.

Zapojenie pozostáva so samotného laseru opísaného v rámci kapitoly 3.2.1, za ktorý bol z dôvodu minimalizácie pôsobenia odrazov umiestnený izolátor. Následne pomocou splitteru s deliacim pomerom  $1 \times 4$  je svetelný zväzok rozdelený do 2 vetiev pozostávajúcich s jedného kombinovaného meracieho a referenčného vlákna o dĺžke 30 m. Na konci každej vetvy je pomocou coupleru  $2 \times 2$  s využitím len jedného výstupu signál znovu skombinovaný a privedený na vstup fotodetektoru.

V rámci obr. 7.2 je ilustrované rozloženie jednotlivých komponentov v rámci miestnosti, kde blok PD zjednodušene ilustruje fotodetektor s napájaním, OpFIS je vyvinuté zabezpečovacie zariadenie a notebook slúžil na zobrazenie užívateľského rozhrania.



Obr. 7.2: Ilustrácia zapojenia v miestnosti SC 5.52.

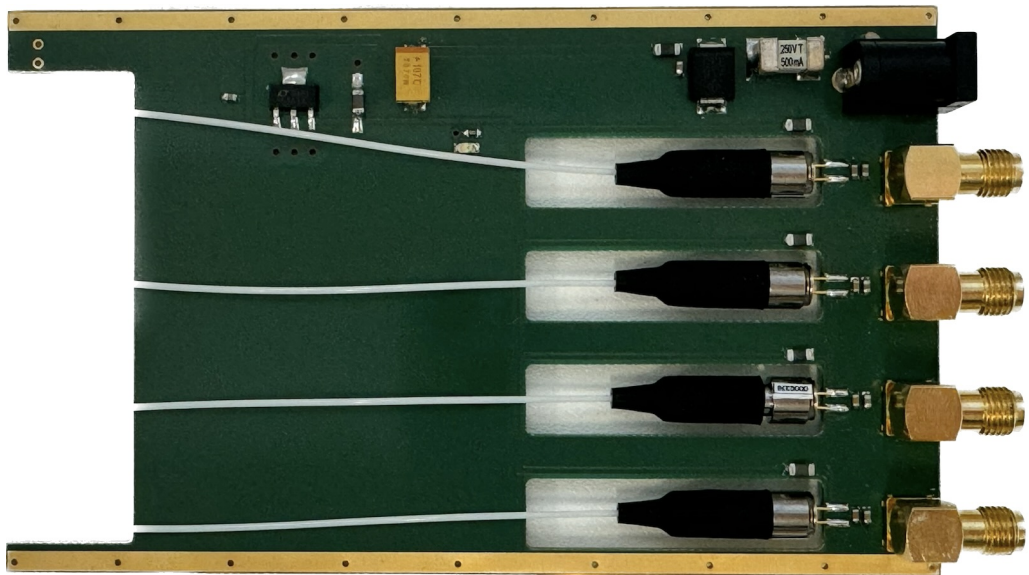
## 7.2 Výber fotodetektoru

Na dosiahnutie čo najlepších výsledkov zabezpečovacieho zariadenia bolo žiadúce zabezpečiť rovnaký charakter vstupných signálov. Z tohto dôvodu bolo pretestovaných niekoľko fotodetektorov prevažne od firmy Koheron, ktoré by vykazovali najmenšie kolísanie signálu. Medzi otestované fotodetektory Koheron, ktoré boli v daný moment dostupné na fakulte spadali

- Koheron PD01-DC-400,
- Koheron PD10S-5-DC,
- Koheron PD100B-DC,
- Koheron PD100-DC v dvoch verziách.

Zapojením fotodetektorov bolo zistené, že najlepšie výsledky vykazoval fotodetektor PD100-DC vo verzií v.1. Jeho priebeh bol kontinuálny v okolí nuly bez prítomnosti kolísania a v prípade pohybu výchylky siahali do hodnôt 100000.

Avšak z dôvodu potreby dvoch fotodetektorov s rovnakými vlastnosťami, nebolo z vyššie spomenutých možné vybrať odpovedajúcu dvojicu. Na základe tohto výsledku bol vedúcim práce dodaný zákazkovo vyrobený štvor kanálový fotodetektor s neznámymi parametrami, viď obr. 7.3. Po otestovaní tohto fotodetektoru bolo rozhodnuté jeho nasadenie, keďže ako jediný dokázal poskytovať akceptovateľné výsledky. Ďalším pozitívnym prínosom tohto fotodetektoru je aj fakt, že jeho nákupná cena je polovičná v porovnaní s Koheronom.



Obr. 7.3: Použitý fotodetektor.

### 7.3 Nastavenie thresholdov

Aby zariadenie dokázalo správne vyhodnocovať alarmy bez spúšťania falošných alarmov bolo nutné vykonať niekoľko testovacích meraní pre stanovenie optimálnej hodnoty thresholdu. V prípade ak je hodnota smerodajnej odchýlky väčšia ako hodnota thresholdu je okno považované za pozitívne, čo odzrkadľuje detekovanú aktivitu na vlákne. Pozorovanie hodnoty smerodajnej odchýlky pre aktuálne okno bolo za použitia výpisov v termináli platformy. Pri meraní bolo postupované podľa rovnakých testovacích scenárov ako v prípade finálneho testovania.

Spriemerovaním odpožorovaných hodnôt boli optimálne úrovne thresholdov definované ako uvádza tab. 7.1.

Tab. 7.1: Hodnoty thresholdov jednotlivých kanálov.

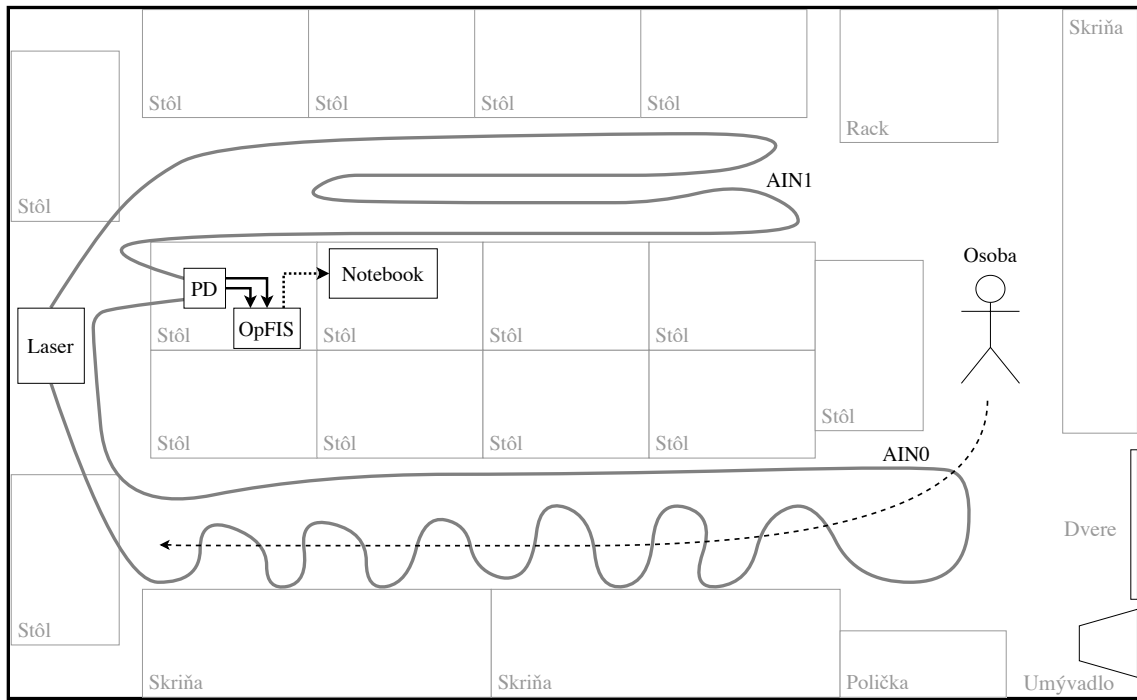
| Kanál | Hodnota |
|-------|---------|
| AIN0  | 8000    |
| AIN1  | 4000    |

### 7.4 Testovací scenár 1

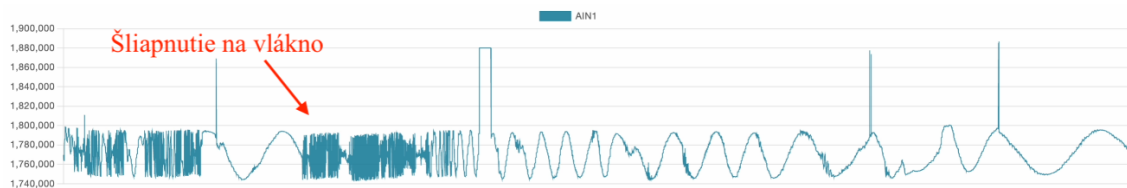
Prvý testovací scenár spočíval v prechode povolanej osoby v tesnej blízkosti položeného vlákna s označením AIN0. Počas testovania boli optické vlákna AIN0 a AIN1 voľne položené na podlahe miestnosti, bez akéhokoľvek spôsobu pevného uchytenia.

Presnú trajektóriu pohybu osoby opisuje prerušovaná čiara, vid' 7.4 vedúca ponad spomínané vlákno.

Snahou testovacej osoby bolo zamedziť priamemu kontaktu chodidla s vláknom, ktorý spôsoboval pravdepodobne z dôvodu neprichytenia vlákna k podlahe vo vlákne rezonanciu. Tento jav počas merania nastal niekoľkokrát a negatívne ovplyvnil priebeh merania zvyšovaním smerodajnej odchýlky okna. Priebeh signálu po dotyku osoby s optickým vláknom je zobrazený v obr. 7.5.



Obr. 7.4: Ilustrácia testovacieho scenáru č. 1.

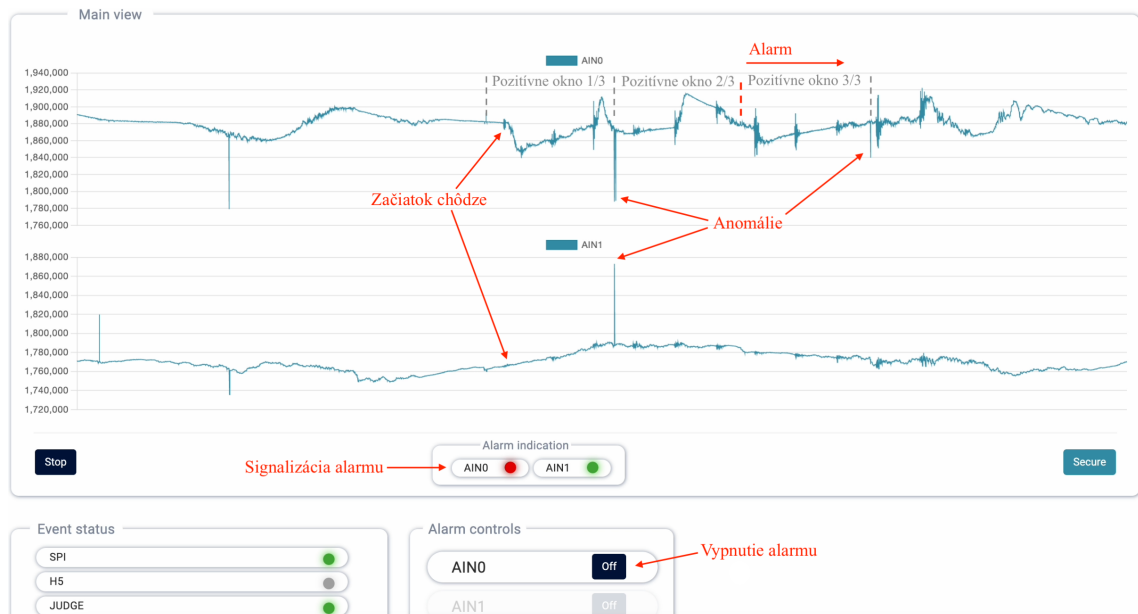


Obr. 7.5: Priebeh signálu po priamom dotyku chodidla s vláknom.

Z priebehov signálov je možné odpozorovať niekoľko zásadných faktov. Z dôvodu umiestnenia oboch vlákien v rámci jednej miestnosti je výchylku signálu spôsobenú pohybom osoby možné detekovať aj na druhom meracom vlákne. Spúšťanie falošných alarmov spôsobené touto udalosťou bolo možné vo vysokej miere eliminovať pomocou metódy troch pozitívnych okien a nastavením správnej hodnoty thresholdu.

V rámci zobrazenia priebehov možno identifikovať nežiadúce anomálie, ktoré boli pravdepodobne spôsobené počas procesu čítania z prevodníku alebo zápisu do zdieľanej pamäte. V rámci programu bola implementovaná technika eliminácie týchto výkyvov, ktorá dokázala desať násobne znížiť rád hodnoty vychýlenia. Metóda spočíva v nahradzovaní veľmi odchylených hodnôt za predchádzajúcu alebo nasledujúcu hodnotu.

Zo zabezpečovacieho hľadiska priebeh signálu jasne ilustruje počiatok a ukončenie chôdze. Pomocou prerušovaných čiar boli zvýraznené okná o veľkosti 2000 vzoriek, na základe ktorých prebiehalo vyhodnocovanie. Červenou prerušovanou čiarou je značené miesto vyhodnotenia a spustenia alarmu, ktoré aktivovalo proces signalizácie alarmu a možnosť jeho vypnutia. Pri chôdzi ponad meracie vlákno AIN0 nebol spustený alarm druhej vetvy.



Obr. 7.6: Zobrazenie Dashboard počas priebehu testovacieho scenáru č. 1.

## 7.5 Testovací scenár 2

V prípade druhého testovacieho scenára bola osoba poverená prechodom ponad meracie vlákno s označením AIN1, viď obr. 7.7. Rovnako tak ako v prípade testovacieho scenára 1, osoba prechádzala ponad vlákno bez priameho kontaktu snímačom.

Z priebehu signálov 7.8 možno zaznamenať niekoľkonásobne väčšie výchylky signálu na nameranom vlákne AIN0. Správnym nastavením úrovne thresholdu, viď tab. 7.1 bolo zamedzené spúšťanie falošných alarmov. Treba však dodať, že použitie dvoch vlákien v rámci jedného priestoru nie je optimálne, ale z dôvodu nedostatku

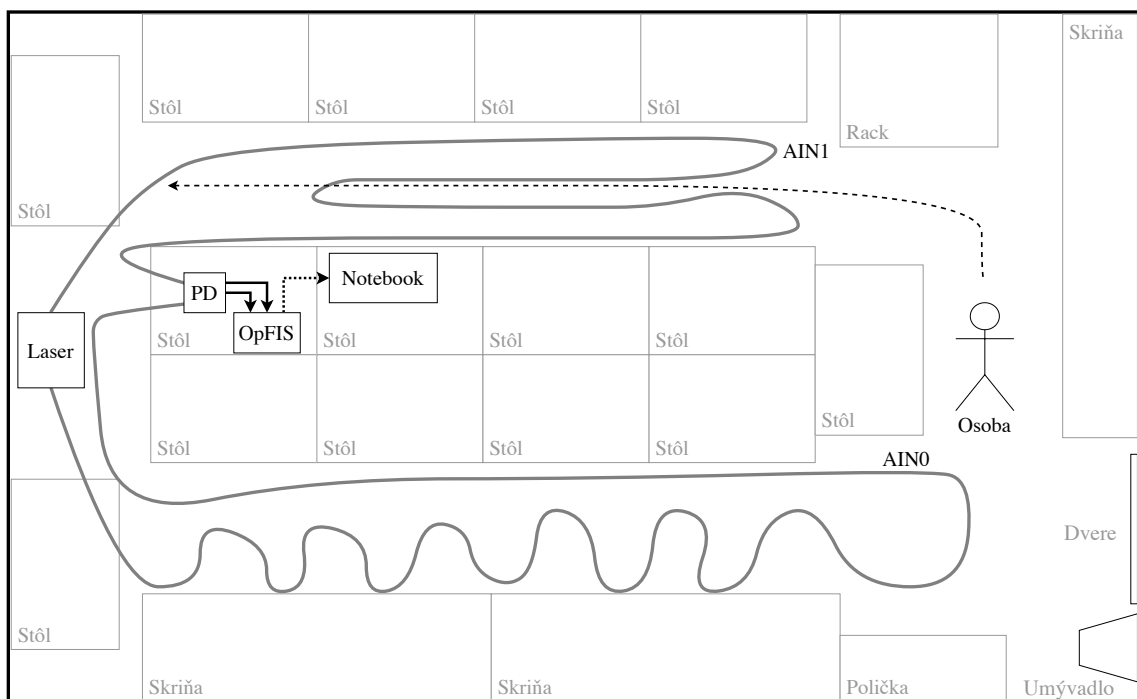
času nebolo možné docieľiť nasimulovanie optimálnych podmienok použitím viacerých priestorov.

Prechodom osoby bolo možné v terminálovom výpise registrovať hodnoty smerodajnej odchýlky okien kanála AIN1 približne 8000 až 10000. V rámci priebehu boli vyznačené významné udalosti ako počiatok chôdze a jednotlivé pozitívne okná. Je možné vidieť, že aj pri počatí chôdze približne v polovici okna, sa stalo okno pozitívnym.

## 7.6 Testovací scenár 3

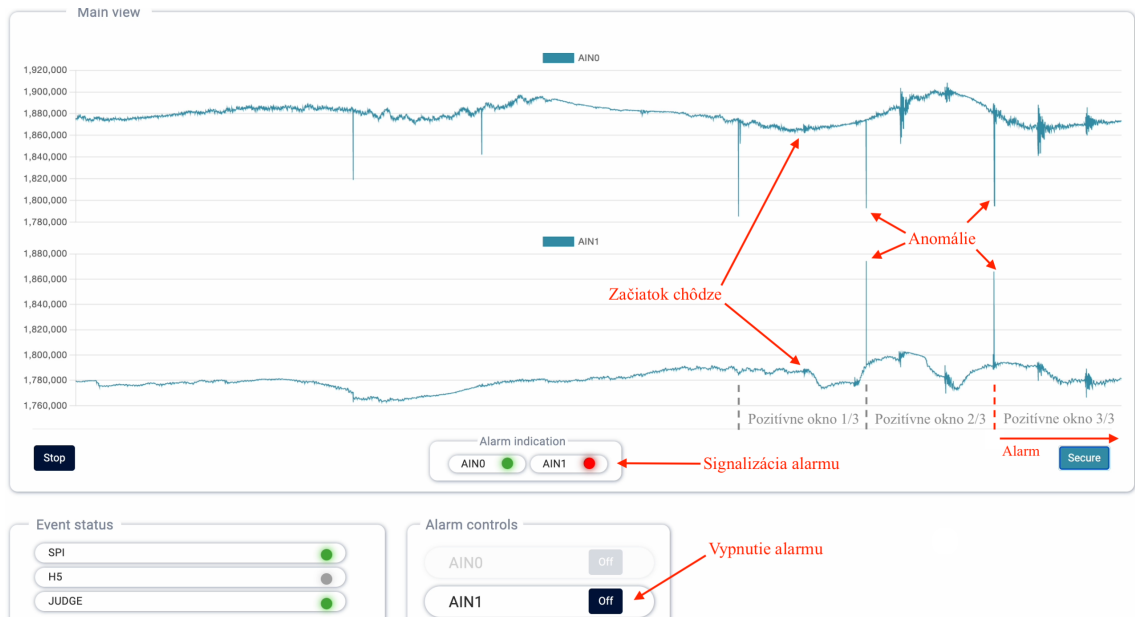
V poslednom kroku bola otestovaná odolnosť voči spúšťaniu falošných alarmov nespôsobovaných chôdzou človeka. Testovací scenár 3 spočíval v zhodení predmetu o hmotnosti približne 270 g v tesnej blízkosti vlákna. Tento scenár mal imitovať náhodné padnutie predmetu v zabezpečenej miestnosti z neznámeho dôvodu, iného ako prítomnosťou nepovolanej osoby. Test sa javil relevantný, keďže v prípade pádu predmetu z dôvodu prítomností osoby by nasledovali aj kroky, ktoré sú otestované v rámci prvých dvoch scenárov.

Na merania padnutia predmetu bolo náhodne vybrané miesto v rámci miestnosti, ktoré je označené krížikom v kruhu, viď obr. 7.9. V priebehu možno vidieť dvojnásobné padnutie predmetu z časovým rozptylom približne 12 sekúnd, kedy ani jeden z pádov nespustil alarm.

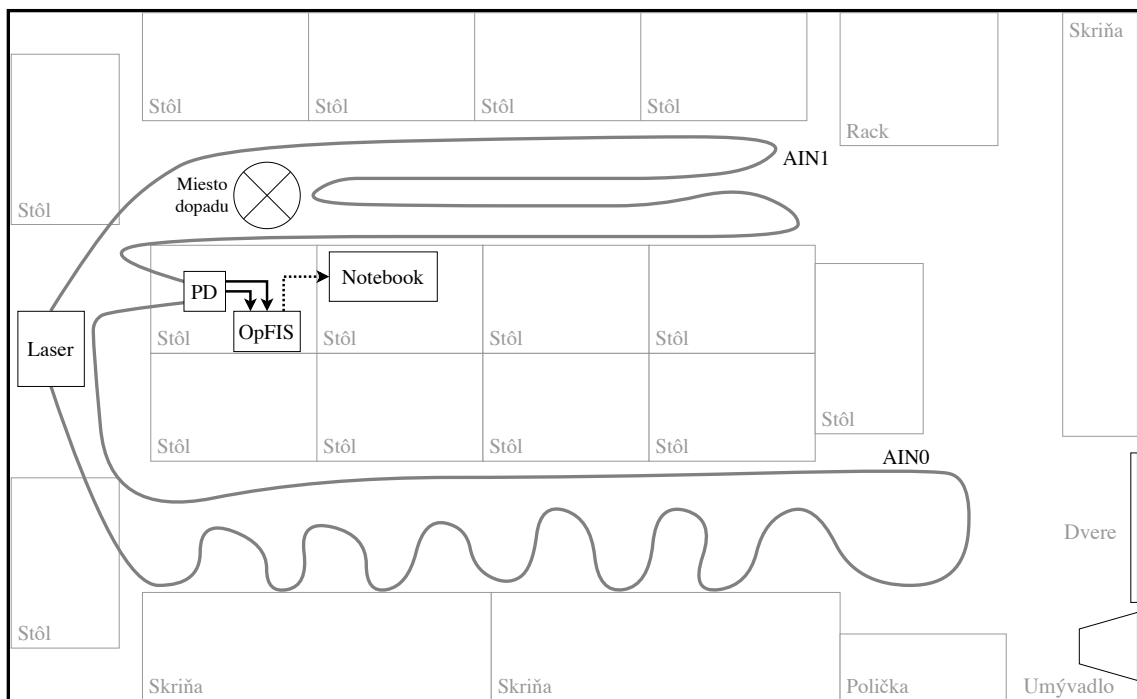


Obr. 7.7: Ilustrácia testovacieho scenáru č. 2.

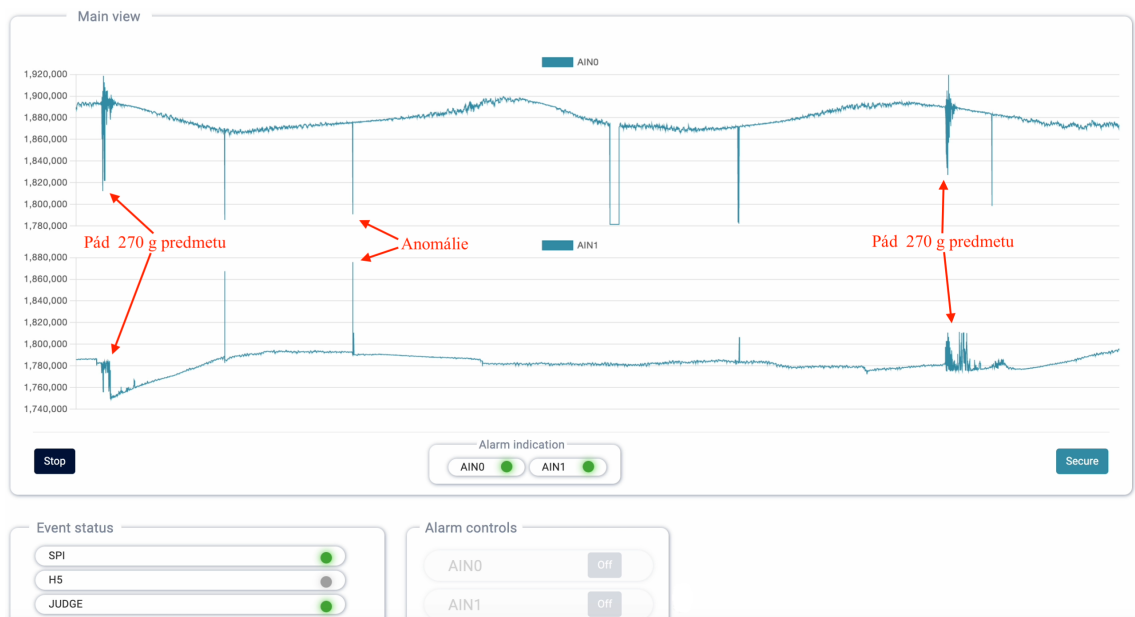




Obr. 7.8: Zobrazenie Dashboard počas priebehu testovacieho scenáru č. 2.



Obr. 7.9: Ilustrácia testovacieho scenáru č. 3.



Obr. 7.10: Zobrazenie Dashboard počas priebehu testovacieho scenáru č. 3.

## 8 Ekonomický aspekt

Jednou z veľkých nevýhod optického vláknového snímania fyzikálnych veličín je vysoká nákupná cena jednotlivých komponentov. V rámci riešenia práce nebol braný ohľad na tento parameter, keďže boli využívané diely poskytnuté vedúcim práce, ktoré boli dostupné na ústave.

Ceny jednotlivých komponentov použitých na vytvorenie zabezpečovacieho systému, sú obsiahnuté v rámci tab. 8.1. Z dôvodu nedostupnosti dátových háčkov niektorých komponentov, nebolo možné zistiť ich názov a tým ani presnú cenu. Z hľadiska použitých komponentov je približná cena testovaného zariadenia odhadovaná na 4168,27 €.

Tab. 8.1: Ceny jednotlivých komponentov.

| Názov                  | Popis                    | Počet | Cena [€/ks] |
|------------------------|--------------------------|-------|-------------|
| AeroDIODE Model 2      | Laserová dioda           | 1     | 1345,00     |
| Thorlabs CLD1015       | Riadiaca jednotka laseru | 1     | 2363,76     |
| OSPL-1x04-900-1m-SCA   | Splitter 1 × 4           | 1     | 8,79        |
| OPA-9A-SCA/SCA-15D-ZX  | Optický kábel            | 4     | 10,23       |
| FCBB- 11A481110        | Coupler 2 × 2            | 2     | 45,00       |
| OISM-103111131         | Izolátor                 | 1     | 65,00       |
| N/A                    | Fotodetektor             | 1     | ± 100,00    |
| RG58                   | Koaxiálny kábel          | 2     | 27,12       |
| Raspberry Pi 4 model B | Platforma                | 1     | 69,95       |
| ADS1256 ADC            | AD prevodník             | 1     | 21,75       |
| Ostatné diely          | DPS                      | 1     | 8,86        |

### 8.1 Porovnanie s komerčnými systémami

Ako opisuje predošlý text, cena výsledného zariadenia dosahuje hodnoty približne 4200 €. Ako autor práce si dovoľujem povedať, že cenu tohto zariadenia by bolo možné v rádoch tisícok € znížiť použitím laserovej zostavy s horšími parametrami. Pri nahradení použitého laseru spolu s riadiacou jednotkou napr. za Koheron LD101 s cenovkou 345 €, by cena zariadenia klesla na hodnotu 804,51 €. Rovnako tak do výslednej ceny nie je zarátaný čas investovaný do vývoja, ktoré komerčné produkty do svojej obchodnej ceny zahŕňajú.

Pre zaručenie adekvátneho porovnania boli vybrané zabezpečovacie systémy, ktoré dokážu zabezpečiť približne dve miestnosti. Keďže sa zabezpečovacími systémami zaoberá veľké množstvo firiem, ktoré nie je možné obsiahnuť v texte tejto práce, bolo snahou vybrať niekoľko elektrických zabezpečovacích systémov z viacerých cenových kategórií.

### **Jablotron 100**

Jablotron 100 set obsahuje tri pohybové senzory na detekciu pohybu, ústredňu, prístupový modul, vonkajšiu a vnútornú sirénu. Set sa dá zakúpiť v dvoch variantách:

1. bezdrôtová verzia za cenu 1200 € a
2. káblová verzia za cenu 840 € [65].

Výhodou systému od firmy Jablotron je implementácia GSM (Global System for Mobile communication)/GPRS (General Packet Radio Service) komunikátoru, ktorý umožňuje signalizovať alarm pomocou SMS (Short Message Service) alebo telefonátu. Systém je rovnako tak zálohovaný v prípade výpadku elektrickej energie [65].

### **Ajax StarterKit Plus**

Balíček Ajax StarterKit Plus v základe poskytuje hub, jeden pohybový senzor, detektor otvorenia dverí a diaľkový ovládač. Hub umožňuje komunikáciu cez štandardy ako Ethernet, Wi-Fi, WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) a GSM. Ovládanie alarmu je zabezpečené pomocou mobilnej aplikácie a diaľkového ovládača. Pohybové senzory implementujú techniku nezaznamenávania zvierat. Cena tohto balíčku je 625,64 € pričom je potrebné zaradiť ešte jedno pohybové čidlo s cenou 103,90 € [66].

### **iGET SECURITY M5-4G**

Súprava obsahuje jednu centrálnu jednotku, klávesnicu, dverový senzor, pohybový senzor a ovládač. S okolitým svetom komunikuje pomocou Wi-Fi a GSM. Negatívne recenzie spomínajú samovoľné spúšťanie alarmu a občasnú nefunkčnosť klávesnice. Cena kompletu je 268,90 €, pričom je potrebné dokúpiť ešte jeden pohybový senzor v cene 23,90 € [66].

### **Loxone**

Snáď jedným s najprémiovejších priekopníkov v rámci domácej automatizácie a zabezpečenia je firma Loxone. Zabezpečenie Loxone ponúka pokročilé metódy ohlasovania alarmov v prepojení s ostatnými prvkami ako žalúziami a reproduktormi.

Koncept firmy nie je poskytovať čisto len zabezpečovacie zariadenia ale aj prvky inteligentnej domácnosti a všetko zosúladiť. Na základe tohto faktu sa ťažko určuje cena výslednej inštalácie, avšak možno pre predstavu použiť ako referenčnú hodnotu cenu základnej varianty Clever v hodnote 3506,78 € [67].

# Záver

Cielom diplomovej práce bolo vyhotovenie zabezpečovacieho systému vyhodnocujúceho signál z optických vláknových senzorov.

V rámci teoretickej časti práce boli detailne opísané jednotlivé typy optických vláknových senzorov založené na princípe interferometrie, reflektometrie alebo difrakčných štruktúr. Jednotlivé typy boli detailne popísané z hľadiska spôsobu fungovania a možnosti využitia. Následne bola popísaná aj téma aktuálneho stavu tejto problematiky, ktorá potvrdzuje aktuálnosť témy optického vláknového snímania.

Na základe teoretických poznatkov bola vybratá architektúra Machovho–Zenderovho a Michelsonovho interferometru. Výber bol grafický spracovaný do tabuľky a diskutovaný. Následne boli tieto dva druhy interferetrov otestované v dvoch variantách a to pri konfigurácií so separovaným a kombinovaným referenčným a meracím vláknom. V prípade Michelsonovho interferometru bola neúspešne otestovaná len konfigurácia s kombinovaným vláknom, ktorý sa javil veľmi necitlivo. Následne prebehol výber jedného z dvoch zapojení na základe porovnania nameraných výsledkov, z ktorého vyplynul záver použitia Machovho–Zenderovho interferometru v konfigurácií s kombinovaným meracím a referenčným vláknom pre zabezpečovací systém.

Na základe naplnenia cieľov práce bolo vytvorené zariadenie pracujúce na platforme Raspberry Pi 4, ktorého funkcionality bola rozšírená o vlastnoručne vytvorenú dosku plošného spoju s požadovanými komponentami. Produkt bol uvedený do finálnej podoby vytvorením modelu ochranného krytu zariadenia pomocou technológie 3D tlače.

Pre zabezpečenie funkcionality bol vytvorený vyhodnocovací program v jazyku Python, ktorého myšlienka fungovania je popísaná v rámci diplomovej práce. Pre spríjemnenie práce so zariadením bola naprogramovaná aj aplikácia s grafickým rozhraním, ktorá poskytovala užívateľovi potrebné prvky na ovládanie zariadenia.

Otestovaním zariadenia bola dokázaná schopnosť správneho vyhodnocovania narušenia dvoch vytvorených častí priestoru a jeho odolnosť voči spúšťaniu falošných alarmov. Úspešnosť zariadenia spočívala v implementácii metódy troch pozitívnych okien, správnom nastavení úrovni thresholdov, eliminácií vzniknutých anomálií a výbere správneho fotodetektoru.

V poslednom kroku práce bola vypočítaná celková cena vyvinutého zariadenia a porovnaná s cenou komerčných elektronických zabezpečovacích systémov. Z porovnania vychádza, že v momentálnej dobe nie je testované zariadenie konkurencie schopné, čo však môže byť cieľom pre ďalšie vypracovanie.

## Literatúra

- [1] FRANCIS T. S., Yu a SHIZHUO, Yin. *Fiber Optic Sensors*. CRC Press, 2002. ISBN 978-0824707323.
- [2] DI SANTE, Raffaella. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications. Online. *Sensors*. 2015, roč. 15, č. 8, s. 18666-18713. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s150818666>. [cit. 2023-10-11].
- [3] PENDÃO, Cristiano a SILVA, Ivo. Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications. Online. *Sensors*. 2022, roč. 22, č. 19. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s22197554>. [cit. 2023-10-11].
- [4] LEE, Byeong Ha; KIM, Young Ho; PARK, Kwan Seob; EOM, Joo Beom; KIM, Myoung Jin et al. Interferometric Fiber Optic Sensors. Online. *Sensors*. 2012, roč. 12, č. 3, s. 2467-2486. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s120302467>. [cit. 2023-10-10].
- [5] RAJAN, Ginu. *Optical Fiber Sensors : Advanced Techniques and Applications*. Online. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 978-1-4822-2829-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/b18074>. [cit. 2023-10-13].
- [6] BARRIAS, António; CASAS, Joan a VILLALBA, Sergi. A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications. Online. *Sensors*. 2016, roč. 16, č. 5. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s16050748>. [cit. 2023-10-11].
- [7] ŠIFTA, Radim. *Optovláknové senzorické systémy*. Online. AUTOMA. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-cislo/automa-2020\\_05/](https://automa.cz/cz/casopis-cislo/automa-2020_05/). [cit. 2023-10-11].
- [8] KANG, Jin. *Fiber Optic Sensing and Imaging: Fiber Optic Interferometric Devices*. Online. Baltimore: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-7482-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7482-1>. [cit. 2023-10-11].
- [9] MARTINCEK, Ivan; KACIK, Daniel a HORAK, Jakub. Interferometric optical fiber sensor for monitoring of dynamic railway traffic. Online. *Optics & Laser Technology*. 2021, roč. 140. ISSN 00303992. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107069>. [cit. 2023-10-21].

- [10] LYU, Weimin; CHEN, Shuyang; TAN, Fengze a YU, Changyuan. Vital Signs Monitoring Based on Interferometric Fiber Optic Sensors. Online. *Photonics*. 2022, roč. 9, č. 2. ISSN 2304-6732. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/photonics9020050>. [cit. 2023-10-19].
- [11] CULSHAW, B. The optical fibre Sagnac interferometer: an overview of its principles and applications. Online. *Measurement Science and Technology*. 2006, roč. 17, č. 1, s. R1-R16. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/1/R01>. [cit. 2023-10-18].
- [12] DEJDAR, Petr. *Optické vláknové senzory*. Online, Dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154917>. [cit. 2024-05-14].
- [13] ÅSLUND, Mattias L.; MICHIE, Andrew; CANNING, John; HOLDSWORTH, John a FLEMING, Simon. Michelson interferometer with Faraday mirrors employed in a delayed self-heterodyne interferometer. Online. *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*. 2011, s. 1-3. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5875599>. [cit. 2024-05-14].
- [14] JOE, Hang-Eun; YUN, Huitaek; JO, Seung-Hwan; JUN, Martin B.G. a MIN, Byung-Kwon. A review on optical fiber sensors for environmental monitoring. Online. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2018, roč. 5, č. 1, s. 173-191. ISSN 2288-6206. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0017-6>. [cit. 2023-10-20].
- [15] CAMPANELLA, Carlo; CUCCOVILLO, Antonello; CAMPANELLA, Clarissa; YURT, Abdulkadir a PASSARO, Vittorio. Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications. Online. *Sensors*. 2018, roč. 18, č. 9. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s18093115>. [cit. 2023-10-23].
- [16] TODD, Michael D; NICHOLS, Jonathan M; TRICKEY, Stephen T; SEAVER, Mark; NICHOLS, Christy J et al. Bragg grating-based fibre optic sensors in structural health monitoring. Online. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007, roč. 365, č. 1851, s. 317-343. ISSN 1364-503X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1937>. [cit. 2023-10-23].



- [17] MIHAILOV, Stephen J. Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments. Online. *Sensors*. 2012, roč. 12, č. 2, s. 1898-1918. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s120201898>. [cit. 2023-11-08].
- [18] EFTIMOV, Tinko. Sensor Applications of Fiber Bragg and Long Period Gratings. Online. *NATO Security through Science Series B: Physics and Biophysics*. 2007, s. 1-23. ISBN 978-1-4020-6950-5. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6952-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6952-9_1). [cit. 2023-11-08].
- [19] STAWSKA, Hanna Izabela a POPENDA, Maciej Andrzej. Refractive Index Sensors Based on Long-Period Grating in a Negative Curvature Hollow-Core Fiber. Online. *Sensors*. 2021, roč. 21, č. 5. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s21051803>. [cit. 2023-11-09].
- [20] DONG, Xiaoyi; ZHANG, Hao; LIU, Bo a MIAO, Yinping. Tilted fiber Bragg gratings: Principle and sensing applications. Online. *Photonic Sensors*. 2011, roč. 1, č. 1, s. 6-30. ISSN 1674-9251. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13320-010-0016-x>. [cit. 2023-11-11].
- [21] ALBERT, Jacques; SHAO, Li-Yang a CAUCHETEUR, Christophe. Tilted fiber Bragg grating sensors. Online. 2013, roč. 7, č. 1, s. 83-108. ISSN 1863-8880. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/lpor.201100039>. [cit. 2023-11-11].
- [22] CHEN, Chengkun a ALBERT, Jacques. Strain-optic coefficients of individual cladding modes of singlemode fibre: theory and experiment. Online. *Electronics Letters*. 2006, roč. 42, č. 18. ISSN 00135194. Dostupné z: <https://doi.org/10.1049/e1:20061631>. [cit. 2023-11-11].
- [23] TOSI, Daniele. Review of Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG) Fiber-Optic Sensors and Their Applications. Online. *Sensors*. 2018, roč. 18, č. 7. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s18072147>. [cit. 2023-11-12].
- [24] OKABE, Yoji; TSUJI, Ryohei a TAKEDA, Nobuo. Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack locations in composites. Online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2004, roč. 35, č. 1, s. 59-65. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.004>. [cit. 2023-11-13].
- [25] PISCO, Marco; IADICICCO, Agostino; CAMPOPIANO, Stefania; CUTOLO, Antonello a CUSANO, Andrea. Structured Chirped Fiber Bragg Gratings. Online. *Journal of Lightwave Technology*. 2008, roč. 26, č. 12, s. 1613-1625. ISSN 0733-8724. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.920597>. [cit. 2023-11-13].

- [26] LU, Ping; LALAM, Nageswara; BADAR, Mudabbir; LIU, Bo; CHORPENING, Benjamin T. et al. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective. Online. *Applied Physics Reviews*. 2019, roč. 6, č. 4. ISSN 1931-9401. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.5113955>. [cit. 2023-10-18].
- [27] TURÁN, Ján a PETRÍK, Stanislav. *Optické vláknové senzory*. Bratislava: Alfa, 1991. ISBN 80-050-0655-1.
- [28] FLORIS, Ignazio; ADAM, Jose M.; CALDER-N, Pedro A. a SALES, Salvador. Fiber Optic Shape Sensors: A comprehensive review. Online. *Optics and Lasers in Engineering*. 2021, roč. 139. ISSN 01438166. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106508>. [cit. 2023-11-22].
- [29] TANG, Fujian; ZHOU, Guoshuai; LI, Hong-Nan a VERSTRYNGE, Els. A review on fiber optic sensors for rebar corrosion monitoring in RC structures. Online. *Construction and Building Materials*. 2021, roč. 313. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125578>. [cit. 2023-11-22].
- [30] BAO, X.; DHLIWAYO, J.; HERON, N.; WEBB, D.J. a JACKSON, D.A. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering. Online. *Journal of Lightwave Technology*. Roč. 13, č. 7, s. 1340-1348. ISSN 07338724. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/50.400678>. [cit. 2023-11-25].
- [31] *RBtec*. Online. C2024. Dostupné z: <https://www.rbtec.com/>. [cit. 2024-05-10].
- [32] ALLWOOD, Gary; WILD, Graham a HINCKLEY, Steven. Optical Fiber Sensors in Physical Intrusion Detection Systems: A Review. Online. *IEEE Sensors Journal*. 2016, roč. 16, č. 14, s. 5497-5509. ISSN 1530-437X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2535465>. [cit. 2024-05-10].
- [33] *Sensonic*. Online. Dostupné z: <https://www.sensonic.com/>. [cit. 2024-05-10].
- [34] LAN, Tian; ZHANG, Chunxi; LI, Lijing; LUO, Guangming a LI, Chen. Perimeter security system based on fiber optic disturbance sensor. Online. *Proceedings of SPIE*. 2008, s. 68300J-. ISSN 0277786X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.756541>. [cit. 2024-05-10].
- [35] KUMAGAI, Tatsuya; SATO, Shinobu; OHNUKI, Wataru a NAKAMURA, Teruyuki. Fiber-optic intrusion detection sensor for physical security system. Online. 2011, s. 775331-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.883338>. [cit. 2024-05-10].

- [36] HSIEH, Hsin; HSU, Kai-Shuo; JONG, Tai-Lang a WANG, Likarn. Multi-Zone Fiber-Optic Intrusion Detection System With Active Unbalanced Michelson Interferometer Used for Security of Each Defended Zone. Online. *IEEE Sensors Journal*. 2020, roč. 20, č. 3, s. 1607-1618. ISSN 1530-437X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2946904>. [cit. 2024-05-10].
- [37] ALLWOOD, Gary; HINCKLEY, Steven a WILD, Graham. Optical Fiber Bragg grating based intrusion detection systems for homeland security. Online. *2013 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*. 2013, s. 66-70. ISBN 978-1-4673-4637-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/SAS.2013.6493558>. [cit. 2024-05-10].
- [38] CATALANO, Angelo; BRUNO, Francesco Antonio; GALLIANO, Carlo; PISCO, Marco; PERSIANO, Giovanni Vito et al. An optical fiber intrusion detection system for railway security. Online. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017, roč. 253, s. 91-100. ISSN 09244247. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.11.026>. [cit. 2024-05-10].
- [39] LIGHTWAVESTORE.COM. *Lightwavestore.com FiberOptics Parts & Equipment*. Online. Dostupné z: <https://www.lightwavestore.com/>. [cit. 2023-12-02].
- [40] KOHERON. *Products*. Online. Dostupné z: <https://www.koheron.com/products/>. [cit. 2023-12-02].
- [41] AERODIODE. *1550 nm laser diode — CW or Pulsed*. Online. Dostupné z: <https://www.aerodiode.com/product/1550-nm-laser-diode-dfb-pulsed/>. [cit. 2023-12-04].
- [42] THORLABS. *Compact Laser Diode Driver with TEC and Mount for Butterfly Packages*. Online. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_ID=5882](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=5882). [cit. 2023-12-04].
- [43] RASPBERRY PI LTD. *Raspberry Pi Documentation*. Online. RASPBERRY PI LTD. Raspberry Pi. C2021-2024. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/>. [cit. 2024-04-23].
- [44] VRBA, Kamil a KUBÁNEK, David. *A/D a D/A převodníky pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Online. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. ISBN 978-80-214-5116-2. Dostupné z: [https://www.vut.cz/studenti/predmety/detail/76312?apid=76312#:~:text=AD\\_a\\_DA\\_prevodniky\\_pro\\_integrovanou\\_vyuku\\_VUT\\_a\\_VSB%2DTU0\\_konecna\\_verze%20%5B.pdf%5D](https://www.vut.cz/studenti/predmety/detail/76312?apid=76312#:~:text=AD_a_DA_prevodniky_pro_integrovanou_vyuku_VUT_a_VSB%2DTU0_konecna_verze%20%5B.pdf%5D). [cit. 2024-04-24].

- [45] *ELECOM*. Online. C2024. Dostupné z: <https://www.elecom.sk/>. [cit. 2024-04-27].
- [46] *Techfun.sk*. Online. C2016. Dostupné z: <https://techfun.sk/>. [cit. 2024-04-27].
- [47] *DRÁTEK.CZ*. Online. Dostupné z: <https://dratek.cz/>. [cit. 2024-04-27].
- [48] *SPI vs I2C Protocols - Pros and Cons*. Online. In: Arrow.com. C2024. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/spi-vs-i2c-protocols-pros-and-cons>. [cit. 2024-04-27].
- [49] *Autodesk Eagle: PCB design made easy for every engineer*. Online. C2024. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/>. [cit. 2024-04-28].
- [50] *GM Electronic*. Online. C2004-2024. Dostupné z: <https://www.gme.sk/>. [cit. 2024-04-29].
- [51] *Ansys SpaceClaim: 3D Modeling Software*. Online. Ansys. C2024. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>. [cit. 2024-05-01].
- [52] *Frontend vs Backend*. Online. Geeks for Geeks. 2023, 18 Apr 2023. Dostupné z: <https://geeksforgeeks.org/frontend-vs-backend/>. [cit. 2024-05-02].
- [53] CAMPBELL, Scott. *BASICS OF THE SPI COMMUNICATION PROTOCOL*. Online. Circuit Basics. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-spi-communication-protocol/>. [cit. 2024-05-03].
- [54] GRUSIN, Mike. *Serial Peripheral Interface (SPI)*. Online. Sparkfun. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi/all>. [cit. 2024-05-03].
- [55] *Very Low Noise, 24-Bit Analog-to-Digital Converter*. Online. Dallas: Texas Instruments, 2003. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/ADS1256>. [cit. 2024-05-03].
- [56] ŠIŠOLÁK, Filip. *Implementace architektury SCADA do optovláknových senzorických systémů*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Petr Dejdar. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/141266>. [cit. 2024-05-04].

- [57] WASSER, Leah A. *Hierarchical Data Formats - What is HDF5?* Online. National Ecological Observatory Network. Dostupné z: <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/about-hdf5>. [cit. 2022-04-17].
- [58] FRAŇO, Milan. *Smerodajná odchýlka: hlboký pohľad na štatistickú mieru variability*. Online. WooAcademy. Dostupné z: <https://wooademy.sk/smerodajna-odchylka/>. [cit. 2024-05-04].
- [59] RAMIREZ, Sebastian. *FastAPI*. Online. Dostupné z: <https://fastapi.tiangolo.com/>. [cit. 2024-05-05].
- [60] *Basics of HTTP*. Online. MDN. C1998-2024. Dostupné z: [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Basics\\_of\\_HTTP](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Basics_of_HTTP). [cit. 2024-05-05].
- [61] *WebSocket*. Online. MDN. C1998-2024. Dostupné z: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebSocket>. [cit. 2024-05-05].
- [62] *WebSocket support in application gateways overview*. Online. Microsoft Learn. 2024. Dostupné z: <https://learn.microsoft.com/zh-tw/azure/application-gateway/application-gateway-websocket>. [cit. 2024-05-05].
- [63] *Angular*. Online. C2010-2024. Dostupné z: <https://angular.io/>. [cit. 2024-05-06].
- [64] BARNES, Russell. *Apache web server: Build a local HTML server with a Raspberry Pi*. Online. The MagPi. 2017. Dostupné z: <https://magpi.raspberrypi.com/articles/apache-web-server>. [cit. 2024-05-08].
- [65] *SmartOnOff*. Online. C2018-2024. Dostupné z: <http://www.smartonoff.sk/>. [cit. 2024-05-11].
- [66] *Alza*. Online. C1994-2024. Dostupné z: <https://www.alza.sk/>. [cit. 2024-05-11].
- [67] *Loxone*. Online. C2024. Dostupné z: <https://www.loxone.com/sksk/>. [cit. 2024-05-11].

## Zoznam symbolov a skratiek

|              |   |
|--------------|---|
| <b>A</b>     | Ampér   |
| <b>AS</b>    | Anti Stokes   |
| <b>B</b>     | dvojlomný koeficient vlákna   |
| <b>BOTDA</b> | (Brillouin Optical Time Domain Analysis) Brillouinová optická analýza v časovej oblasti             |
| <b>BOTDR</b> | (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) Brillouinová optická reflektometria v časovej oblasti |
| <b>c</b>     | rýchlosť svetla   |
| <b>CSS</b>   | Cascading Style Sheets  |
| <b>CFBG</b>  | (Chirped Fiber Bragg Grating) Čirpovaná vláknová Braggova mriežka                                   |
| <b>dB</b>    | decibel   |
| <b>DOVS</b>  | Distribuované optické vláknové senzory  |
| <b>DPS</b>   | Doska Plošného Spoju  |
| <b>DTS</b>   | (Distributed Temperature Sensor) Distribuovaný teplotný senzor                                      |
| <b>FBG</b>   | (Fiber Bragg Grating) Vlákňová Braggova mriežka   |
| <b>FPGA</b>  | (Field Programmable Gate Array) Programovateľné hradľové pole                                       |
| <b>FPI</b>   | Fabryov–Pérotov interferometer  |
| <b>FUT</b>   | (Fiber Under Test) Vlákno zatažené testom   |
| <b>GPIO</b>  | General Purpose Input Output  |
| <b>GPRS</b>  | General Packet Radio Service  |
| <b>GSM</b>   | Global System for Mobile Communication  |
| <b>h</b>     | Planckova konštanta   |
| <b>HDMI</b>  | High Definition Multimedia Interface  |
| <b>HTTP</b>  | HyperText Transfer Protocol   |

|             |  |
|-------------|--|
| <b>HTML</b> | HyperText Markup Language  |
| <b>Hz</b>   | Hertz  |
| <b>I</b>    | elektrický prúd  |
| <b>I2C</b>  | Inter Integrated Circuit   |
| <b>JSON</b> | JavaScript Object Notation   |
| <b>k</b>    | Boltzmanova konštanta  |
| <b>L</b>    | vzdialenosť  |
| <b>LED</b>  | Light Emitting Diode   |
| <b>LPFG</b> | (Long Period Fiber Grating) Vláknová mriežka s dlhou periódou                          |
| <b>m</b>    | meter  |
| <b>MI</b>   | Michelsonov interferometer   |
| <b>MZI</b>  | Machov–Zenderov interferometer   |
| <b>n</b>    | index lomu   |
| <b>nm</b>   | nanometer  |
| <b>OFDR</b> | (Optical Frequency Domain Reflectometry) Optická reflektometria vo frekvenčnej oblasti |
| <b>OVS</b>  | Optické vláknové senzory   |
| <b>OS</b>   | operačný systém  |
| <b>OTDR</b> | (Optical Time Domain Reflectometry) Optická reflektometria v časovej oblasti           |
| <b>OV</b>   | optické vlákno   |
| <b>P</b>    | výkon  |
| <b>PMF</b>  | (Polarization Maintaining Fiber) Optické vlákno s udržovaním polarizácie               |
| <b>R</b>    | rozptylový koeficient  |
| <b>RAM</b>  | Random Access Memory   |

|              |  |
|--------------|--|
| <b>RDP</b>   | Remote Desktop Protocol  |
| <b>s</b>     | sekunda  |
| <b>S</b>     | Stokes   |
| <b>SBS</b>   | (Stimulated Brillouin Scattering) Stimulovaný Brillouinov rozptyl                              |
| <b>SI</b>    | Sagnacov interferometer  |
| <b>SMS</b>   | Short Message Service  |
| <b>SpBS</b>  | (Spontaneous Brillouin Scattering) Spontánny Brillouinov rozptyl                               |
| <b>SPI</b>   | Serial Peripheral Interface  |
| <b>SSH</b>   | Secure Shell   |
| <b>t</b>     | čas  |
| <b>T</b>     | teplota  |
| <b>TFBG</b>  | (Tilted Fiber Bragg Grating) Naklonená vláknová Braggova mriežka                               |
| <b>UART</b>  | Universal Asynchronous Receiver Transmitter  |
| <b>URL</b>   | Uniform Resource Locator   |
| <b>UV</b>    | Ultra Violet   |
| <b>V</b>     | Volt   |
| <b>VNC</b>   | Virtual Network Computing  |
| <b>W</b>     | Watt   |
| <b>WCDMA</b> | (Wideband Code Division Multiple Access) Širokopásmový viacnásobný prístup s kódovým oddelením |
| <b>Wi-Fi</b> | Wireless Fidelity  |



# A Obsah elektronickej prílohy

Príloha obsahuje frontendovú a backendovú aplikáciu vo forme zdrojového kódu, súbor 3D modelu krytu a všetky potrebné EAGLE súbory. Pre spustenie frontendovej aplikácie je požadované nainštalovať všetky potrebné `node_modules` obsiahnuté v rámci `package.json`. Následne stačí postupovať podľa krokov v súbore `README.md`. Kód backendovej aplikácie bol testovaný vo verzii Pythonu 3.11 a pre zaručenie spustenia je nutné vytvoriť virtuálne prostredie, nainštalovať všetky potrebné moduly a spustiť server pomocou `uvicorn main:app --host 0.0.0.0 --port 8000`.

```
/.....koreňový adresár priloženého archívu
├── backend ..... adresár so súbormi backendovej aplikácie
│   ├── config.py
│   ├── h5.py
│   ├── judge.py
│   ├── main.py
│   ├── spi.py
│   └── OFS.h5
├── frontend ..... adresár so súbormi frontendovej aplikácie
│   ├── dist ..... adresár so skompilovanými súbormi aplikácie
│   └── src ..... adresár zdrojových súborov
│       ├── app ..... adresár hlavného komponentu app
│       │   ├── body ..... adresár s komponentom body
│       │   ├── dashboard ..... adresár s komponentami zobrazenia Dashboard
│       │   ├── h5 ..... adresár s komponentami zobrazenia H5 control panel
│       │   ├── sidenav ..... adresár s komponentami rozbaľovacieho menu
│       │   ├── spi ..... adresár s komponentami zobrazenia SPI control panel
│       │   ├── app.component.css
│       │   ├── app.component.html
│       │   ├── app.component.spec.ts
│       │   ├── app.component.ts
│       │   ├── app.module.ts
│       │   ├── approuting.module.ts
│       │   └── app.component.css
│       ├── angular.json
│       ├── package.json
│       ├── package-lock.json
│       ├── proxy.conf.json
│       ├── README.md
│       ├── tsconfig.app.json
│       ├── tsconfig.json
│       └── tsconfig.spec.json
├── hardware ..... adresár so súbormi návrhu hardvéru
│   ├── OpFISv0_board.brd
│   ├── OpFISv0_schema.sch
│   └── OpFISv17_model.sdoc
```