



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

VZDÁLENÉ OPTOVLÁKNOVÉ POLARIZAČNÍ SENZORY VE SPECIÁLNÍCH PROSTŘEDÍCH

REMOTE FIBER OPTIC POLARIZATION SENSORS IN SPECIAL ENVIRONMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Baláž

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Grenar, Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Dominik Baláž

ID: 222727

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Vzdálené optovláknové polarizační senzory ve speciálních prostředích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami spolu s analýzou současných polarizačních senzorů. Práce se bude zabývat změnou polarizačních stavů ve vláknech zachovávajících polarizaci a taktéž v běžných komunikačních vláknech určených k dálkovému napájení senzorů. Práce má za cíl navrhnout a realizovat funkční uspořádání optovláknových komponent tak, aby senzory byly efektivně použitelné ve speciálních prostředích s důrazem na detekci změn neelektrických veličin.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] COLLETT, Edward. Field Guide to Polarization (SPIE Vol. FG05). 2005. ISBN 9780819458681.
- [2] FILKA, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc. a kol., 2017. ISBN 978-808-6785-141.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 21.5.2024

Vedoucí práce: Ing. David Grenar, 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

Cieľom diplomovej práce je analyzovať šírenie svetla v optických vláknach pomocou dvoch polarizačných rovín a posúdenie súčasných polarizačných senzorov. Dôraz je kladený na diaľkové napájanie polarizačných senzorov v špeciálnych prostrediach. Hlavným príspevkom tejto práce je návrh funkčného usporiadanie optovláknových komponentov tak aby bolo umožnené efektívne využitie senzorov v špeciálnych prostrediach s dôrazom na detekciu zmien neelektrických veličín. Výsledky práce potvrdzujú že senzory poskytujú veľkú mieru spoľahlivosti v náročných podmienkach a tak sú ideálne pre aplikovanie do špeciálnych prostredí, sú vhodné na detekciu na dlhšie vzdialenosti spolu s možnosťou použitia vo vojenskom a chemickom prostredí.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Vláknó zachovávajúce polarizáciu, polarizácie svetla, delič polarizácie, optické vlákno, optický cirkulátor, senzory

ABSTRACT

The aim of this thesis is to analyze the propagation of light in optical fibers using two polarization planes and to assess current polarization sensors. Emphasis is placed on the remote powering of polarization sensors in special environments. The main contribution of this work is the design of the functional arrangement of the optical fiber components to enable efficient use of the sensors in special environments, with emphasis on the detection of changes in non-electrical quantities. The results of the work confirm that the sensors provide a high degree of reliability in harsh environments and so are ideal for application in special environments, being suitable for detection over longer distances along with the possibility of use in military and chemical environments.

KEYWORDS

Polarization Maintaining Fiber, Polarization of Light, Polarization Beam Splitter, Optical Fiber, Optical circulator, Sensors

BALÁŽ, Dominik. *Vzdálené optovláknové polarizační senzory ve speciálních prostředích*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2024. Vedúci práce: Ing. David Grenar

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Bc. Dominik Baláž
VUT ID autora: 222727
Typ práce: Diplomová práca
Akademický rok: 2023/24
Téma záverečnej práce: Vzdálené optovláknové polarizační senzory ve speciálních prostředích

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

Chcel by som vyjadriť úprimný prejav vďaky môjmu vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Davidovi Grenarovi, Ph.D. a taktiež pánovi doc. Ing. Martinovi Kyselákovi, Ph.D. za ich odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a návrhy k diplomovej práci. Ďalej by som rád vyjadril svoje poďakovanie celej mojej rodine za ich podporu, trpezlivosť a lásku. Na záver by som chcel poďakovať svojej priateľke ktorá stála pri mne a podporovala ma.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 15 |
| 1 Základy teórie svetla | 17 |
| 1.1 Teória svetelných lúčov | 17 |
| 2 Polarizácia | 19 |
| 2.1 Polarizácia svetla | 19 |
| 2.2 Fresnelova teória vln | 19 |
| 2.3 Polarizačná elipsa | 21 |
| 2.3.1 Parametre polarizačnej elipsy | 22 |
| 2.4 Poincarého guľa | 22 |
| 2.4.1 Degenerované polarizačné stavy na Poincarého guľi | 23 |
| 2.5 Stokesove polarizačné parametre | 24 |
| 2.5.1 Meranie Stokesových parametrov | 26 |
| 2.6 Degenerované polarizačné stavy | 27 |
| 2.7 Muellerova matica | 28 |
| 3 Optovláknové komponenty | 30 |
| 3.1 Optovláknové cirkulátory zachovávajúce polarizáciu | 30 |
| 3.2 Delič polarizácie | 32 |
| 3.3 Úvod do optických vláknových senzorov | 33 |
| 3.4 Optické vláknové senzory | 33 |
| 3.4.1 Bragovské optické vláknové senzory | 38 |
| 3.4.2 Interferometrické senzory | 39 |
| 3.4.3 Distribuované senzory | 41 |
| 4 Vlákná zachovávajúce polarizáciu | 43 |
| 4.1 Vlákná s dvojlomom | 43 |
| 4.2 Vlákná s vysokým dvojlomom | 43 |
| 4.2.1 Meranie teploty pomocou vlákien s vysokým dvojlomom | 45 |
| 4.2.2 Meranie teploty na vlákne pomocou polarizačného interferometru | 47 |
| 5 Praktická časť | 49 |
| 5.1 Návrh schémy pre meranie | 49 |
| 5.1.1 Porovnanie rôznych navrhnutých schém zapojení | 49 |
| 5.1.2 Návrh možného zapojenia a merania | 51 |
| 5.1.3 Použité zariadenia v zapojení | 52 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2 | Popis jednotlivých komponentov v zapojení | 52 |
| 6 | Realizácia meraní | 55 |
| 6.1 | Detekcia senzorického vlákna pri aplikovaní závaží rôznej hmotnosti . | 55 |
| 6.1.1 | Meranie na 1 km trase | 55 |
| 6.1.2 | Meranie na 50 km trase | 67 |
| 6.1.3 | Meranie na 90 km trase | 79 |
| 6.1.4 | Meranie na reálnej trase | 88 |
| 6.2 | Detekcia teplotných zmien pomocou senzorického vlákna | 100 |
| 6.3 | Detekcia senzorického vlákna pomocou trhačky (proof tester) s cieľom overiť jeho detekčné schopnosti pri mechanickom namáhaní | 102 |
| 7 | Diskusia k meraniam a ich významu | 106 |
| 7.1 | Diskusia k meraniam | 106 |
| 7.2 | Návrh možného zapojenia pre nebezpečné prostredie (vojenský sklad) | 106 |
| | Záver | 109 |
| | Literatúra | 110 |
| | Zoznam symbolov a skratiek | 112 |

Zoznam obrázkov

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Teória svetelných lúčov [1] | 17 |
| 1.2 | Teória lúčov [1] | 17 |
| 1.3 | Teória lúčov [1] | 18 |
| 2.1 | Teória lúčov [1] | 19 |
| 2.2 | Ortogonalná sústava [1] | 20 |
| 2.3 | Grafické znázornenie šírenia dvoch vln [1] | 21 |
| 2.4 | Grafické znázornenie polarizačnej elipsy [1] | 21 |
| 2.5 | Poincarého guľa [1] | 23 |
| 2.6 | Poincarého guľa s degenerovanými polarizačnými stavmi [1, 5] | 24 |
| 2.7 | Poincarého guľa s polarizačnými stavmi s priesečníkmi [1] | 24 |
| 2.8 | Stokesove vektory pre degenerovanú polarizáciu [1] | 26 |
| 2.9 | Meranie Stokesových parametrov [1, 6] | 27 |
| 2.10 | Polarizačné stavy [1] | 28 |
| 2.11 | Šírenie lúča cez polarizačné prvky [1] | 29 |
| 3.1 | Základná schéma cirkulátora [8, 9] | 30 |
| 3.2 | Použitie cirkulátora so systémom DWDM pomocou FBG [8] | 31 |
| 3.3 | Zapojenie cirkulátora v dvoch smeroch po jednom vlákne [8] | 31 |
| 3.4 | Princíp činnosti deliča polarizácie (ThorLabs PBC980PM-FC) [10] | 32 |
| 3.5 | Základné prvky optického senzora [12] | 34 |
| 3.6 | Efekty modulácie svetla používané optickými senzormi na detekciu fyzikálnych parametrov [12] | 34 |
| 3.7 | Vnútroň optický vláknový senzor [14] | 36 |
| 3.8 | Vonkajší optický vláknový senzor [14] | 37 |
| 3.9 | Bragovské optické vláknové senzory [14] | 39 |
| 3.10 | Typy optických interferometrov [14] | 40 |
| 3.11 | Optické snímanie založené na spätnom rozptyle svetla [14] | 41 |
| 3.12 | Spektrá rozptýleného svetla v optickom vlákne [14] | 42 |
| 4.1 | Optické fázové rozdiely medzi ortogonálnymi polarizačnými stavmi [15] | 44 |
| 4.2 | Príklady vlákien s vysokým dvojlomom [15] | 44 |
| 4.3 | Princíp činnosti optického vláknového senzoru s dynamickou polarizačnou metódou [16] | 45 |
| 4.4 | Schématické zapojenie pre meranie teplotnej citlivosti PM vlákien [16] | 46 |
| 4.5 | Graf fázového posunu v závislosti od teploty [16] | 46 |
| 4.6 | Schéma optického vláknového snímača teploty pracujúceho na princípe polarizačného interferometru [17] | 47 |
| 4.7 | Experimentálne zapojenie optického vláknového snímača citlivého na teplotu [17] | 48 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.1 | Navrhnutá jednovláknová schéma zapojenia | 49 |
| 5.2 | Navrhnutá dvojláknová schéma zapojenia | 50 |
| 5.3 | Navrhnutá schéma zapojenia s cirkulátorom | 51 |
| 5.4 | Zobrazenie pootočenia vlákna typu PANDA o 45° | 51 |
| 5.5 | Navrhnutá schéma pre meranie | 52 |
| 5.6 | Polarizačný delič [10] | 53 |
| 5.7 | Cirkulátor [8] | 53 |
| 5.8 | Znázornenie vlákna typu PANDA [19] | 54 |
| 6.1 | Zobrazenie postupnosti pre 1/50/90 km trasu | 55 |
| 6.2 | Schéma zapojenia pre 1 km trasu | 56 |
| 6.3 | Znázornenie rôznych typov závaží pre 1 km trasu | 56 |
| 6.4 | Graf detekcie pri položení a odobratí 20 g závažia (1 km) | 57 |
| 6.5 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 20 g závažia (1 km) | 57 |
| 6.6 | Graf polożenia 20 g závažia v 30 s (1 km) | 57 |
| 6.7 | Graf odobrania 20 g závažia v 60 s (1 km) | 58 |
| 6.8 | Graf detekcie pri položení a odobratí 50 g závažia (1 km) | 59 |
| 6.9 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 50 g závažia (1 km) | 59 |
| 6.10 | Graf polożenia 20 g závažia v 30 s (1 km) | 59 |
| 6.11 | Graf odobrania 50 g závažia v 60 s (1 km) | 60 |
| 6.12 | Graf detekcie pri položení a odobratí 100 g závažia (1 km) | 61 |
| 6.13 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 100 g závažia (1 km) | 61 |
| 6.14 | Graf polożenia 100 g závažia v 30 s (1 km) | 61 |
| 6.15 | Graf odobrania 100 g závažia v 60 s (1 km) | 62 |
| 6.16 | Graf detekcie pri položení a odobratí 200 g závažia (1 km) | 63 |
| 6.17 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 200 g závažia (1 km) | 63 |
| 6.18 | Graf polożenia 200 g závažia v 30 s (1 km) | 63 |
| 6.19 | Graf odobrania 200 g závažia v 60 s (1 km) | 64 |
| 6.20 | Graf detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (1 km) | 65 |
| 6.21 | Detailnejšie zobrazenie grafu detekcie pri položení a odobratí 20 g závažia (1 km) | 65 |
| 6.22 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 500 g závažia (1 km) | 65 |
| 6.23 | Graf polożenia 500 g závažia v 30 s (1 km) | 66 |
| 6.24 | Graf odobrania 500 g závažia v 60 s (1 km) | 66 |
| 6.25 | Integračný graf pri položení 20 g závažia v 30 s (1 km) | 66 |
| 6.26 | Integračný graf pri odobraní 20 g závažia v 60 s (1 km) | 67 |
| 6.27 | Schéma zapojenia pre 50 km trasu | 67 |
| 6.28 | Znázornenie rôznych typov závaží pre 50 km trasu | 68 |
| 6.29 | Graf detekcie pri položení a odobratí 20 g závažia (50 km) | 69 |
| 6.30 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 20 g závažia (50 km) | 69 |

| | |
|--|----|
| 6.31 Graf polozenia 20 g závažia v 30 s (50 km) | 69 |
| 6.32 Graf odobrania 20 g závažia v 60 s (50 km) | 70 |
| 6.33 Graf detekcie pri položení a odobratí 50 g závažia (50 km) | 71 |
| 6.34 Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 50 g závažia (50 km) | 71 |
| 6.35 Graf polozenia 50 g závažia v 30 s (50 km) | 71 |
| 6.36 Graf odobrania 50 g závažia v 60 s (50 km) | 72 |
| 6.37 Graf detekcie pri položení a odobratí 100 g závažia (50 km) | 73 |
| 6.38 Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 100 g závažia (50 km) | 73 |
| 6.39 Graf polozenia 100 g závažia v 30 s (50 km) | 73 |
| 6.40 Graf odobrania 100 g závažia v 60 s (50 km) | 74 |
| 6.41 Graf detekcie pri položení a odobratí 200 g závažia (50 km) | 75 |
| 6.42 Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 200 g závažia (50 km) | 75 |
| 6.43 Graf polozenia 200 g závažia v 30 s (50 km) | 75 |
| 6.44 Graf odobrania 200 g závažia v 60 s (50 km) | 76 |
| 6.45 Graf detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (50 km) | 77 |
| 6.46 Detailnejšie zobrazenie grafu detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (50 km) | 77 |
| 6.47 Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 500 g závažia (50 km) | 77 |
| 6.48 Graf polozenia 500 g závažia v 30 s (50 km) | 78 |
| 6.49 Graf odobrania 500 g závažia v 60 s (50 km) | 78 |
| 6.50 Integračný graf pri položení 500 g závažia (50 km) | 78 |
| 6.51 Integračný graf pri odobraní 500 g závažia (50 km) | 79 |
| 6.52 Schéma zapojenia pre 90 km trasu | 79 |
| 6.53 Znázornenie rôznych typov závaží pre 90 km trasu | 80 |
| 6.54 Graf detekcie pri položení a odobratí 50 g závažia (90 km) | 80 |
| 6.55 Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 50 g závažia (90 km) | 81 |
| 6.56 Graf polozenia 50 g závažia v 30 s (90 km) | 81 |
| 6.57 Graf odobrania 50 g závažia v 60 s (90 km) | 81 |
| 6.58 Graf detekcie pri položení a odobratí 100 g závažia (90 km) | 82 |
| 6.59 Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 100 g závažia (90 km) | 83 |
| 6.60 Graf polozenia 100 g závažia v 30 s (90 km) | 83 |
| 6.61 Graf odobrania 100 g závažia v 60 s (90 km) | 83 |
| 6.62 Graf detekcie pri položení a odobratí 200 g závažia (90 km) | 84 |
| 6.63 Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 200 g závažia (90 km) | 84 |
| 6.64 Graf polozenia 200 g závažia v 30 s (90 km) | 85 |
| 6.65 Graf odobrania 200 g závažia v 60 s (90 km) | 85 |
| 6.66 Graf detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (90 km) | 86 |
| 6.67 Detailnejšie zobrazenie grafu detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (90 km) | 86 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.68 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 500 g závažia (90 km) | 87 |
| 6.69 | Graf položenia 500 g závažia v 30 s (90 km) | 87 |
| 6.70 | Graf odobrania 500 g závažia v 60 s (90 km) | 87 |
| 6.71 | Integračný graf pri položení 500 g závažia (90 km) | 88 |
| 6.72 | Integračný graf pri odobraní 500 g závažia (90 km) | 88 |
| 6.73 | OTDR graf pre 4,5 km reálnu trasu | 89 |
| 6.74 | Schéma zapojenia merania na reálnej trase | 90 |
| 6.75 | Zobrazenie postupnosti pre 4,5 km reálnu trasu | 90 |
| 6.76 | Znázornenie rôznych typov závaží pre 4,5 km reálnu trasu | 90 |
| 6.77 | Graf detekcie pri položení a odobratí 50 g závažia (4,5 km) | 91 |
| 6.78 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 50 g závažia (4,5 km) | 92 |
| 6.79 | Graf položenia 50 g závažia v 30 s (4,5 km) | 92 |
| 6.80 | Graf odobrania 50 g závažia v 60 s (4,5 km) | 92 |
| 6.81 | Graf detekcie pri položení a odobratí 100 g závažia (4,5 km) | 93 |
| 6.82 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 100 g závažia (4,5 km) | 94 |
| 6.83 | Graf položenia 100 g závažia v 30 s (4,5 km) | 94 |
| 6.84 | Graf odobrania 100 g závažia v 60 s (4,5 km) | 94 |
| 6.85 | Graf detekcie pri položení a odobratí 200 g závažia (4,5 km) | 95 |
| 6.86 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 200 g závažia (4,5 km) | 96 |
| 6.87 | Graf položenia 200 g závažia v 30 s (4,5 km) | 96 |
| 6.88 | Graf odobrania 200 g závažia v 60 s (4,5 km) | 96 |
| 6.89 | Graf detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (4,5 km) | 97 |
| 6.90 | Detailnejšie zobrazenie grafu detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (4,5 km) | 98 |
| 6.91 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 500 g závažia (4,5 km) | 98 |
| 6.92 | Graf položenia 500 g závažia v 30 s (4,5 km) | 98 |
| 6.93 | Graf odobrania 500 g závažia v 60 s (4,5 km) | 99 |
| 6.94 | Integračný graf pri položení 500 g závažia (4,5 km) | 99 |
| 6.95 | Integračný graf pri odobraní 500 g závažia (4,5 km) | 99 |
| 6.96 | Schéma zapojenia merania teplotných zmien pri 5 km trase | 100 |
| 6.97 | Graf detekcie pri priložení vody s ľadom o teplote 0°C (5 km) | 101 |
| 6.98 | Redundantný graf zmeny vo výkone pri priložení vody s ľadom o teplote 0°C (5 km) | 101 |
| 6.99 | Detailné zobrazenie priloženia vody s ľadom o teplote 0°C (5 km) | 101 |
| 6.100 | Schéma zapojenia merania pomocou trhačky (proof tester) | 102 |
| 6.101 | Graf detekcie pri natiahnutí senzorického vlákna o sile 10 N (5 km) | 103 |
| 6.102 | Graf zobrazenia detekcie pri natiahnutí senzorického vlákna o sile 10 N (5 km) | 103 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.103 | Detailné zobrazenie detekcie pri natiahnutí senzorického vlákna o sile 10 N (5 km) | 104 |
| 6.104 | Graf detekcie pri natiahnutí senzorického vlákna o sile 20 N (5 km) . | 104 |
| 6.105 | Graf zobrazenia detekcie pri natiahnutí senzorického vlákna o sile 20 N (5 km) | 105 |
| 6.106 | Detailné zobrazenie detekcie pri natiahnutí senzorického vlákna o sile 20 N (5 km) | 105 |
| 7.1 | Navrhnutá schéma pre zapojenie v nebezpečnom prostredí (vojenský sklad) | 107 |

Zoznam tabuliek

| | | |
|-----|----------------------------------|----|
| 3.1 | Senzory pre rôzne aplikácie [12] | 35 |
|-----|----------------------------------|----|

Úvod

Význam a použitie optických vlákien sa neustále rozširuje, vyvíja a využíva nielen v telekomunikáciách ale aj v oblasti sensoriky, čo má veľký potenciál. Technologický pokrok stále rastie a sensorické systémy je nevyhnutné skúmať a optimalizovať. Umožňujú využitie optických vlákien pre detekciu fyzikálnych a chemických veličín v špeciálnych prostrediach.

Diplomová práca sa zameriava na analýzu a vývoj polarizačných optovláknových senzorov. Cieľom nie je len popísať fyzikálne a technické parametre šírenie svetla v optických vláknach a ich využitie ale tiež navrhnúť a overiť nové usporiadanie optovláknových komponentov, tak aby boli diaľkovo napájané s možnosťou využitia v špecifických podmienkach.

Prvá kapitola poskytuje teoretický základ potrebný pre pochopenie fyzikálnych princípov, ktoré umožňujú šírenie svetla v optických vláknach.

Druhá kapitola sa venuje polarizácii, detailne rozoberá polarizáciu svetla, polarizačné stavy a taktiež sa venuje základnom o polarizačných elipsách, Poincarého guli, Stokesovým parametroch a Muellerovej matici.

Tretia kapitola sa venuje optovláknovým komponentom ako cirkulátor, delič polarizácie, ďalej sa venuje optickým vláknovým sensorom ktoré predstavujú množstvo výhod v porovnaní s inými typmi senzorov, výhody úzko súvisia s vlastnosťami optického vlákna, sú malé, ľahké, odolné voči vysokým teplotám a tlaku, okrem toho sú aj elektromagneticky pasívne, ďalej sú v tejto kapitole spomenuté rôzne typy týchto senzorov.

Štvrtá kapitola predstavuje vlákna zachovávajúce polarizáciu, táto časť sa zameriava na špeciálne typy vlákien, ktoré sú navrhnuté tak, že vďaka svojej konštrukcii udržiavajú svetlo v dvoch osiach, majú zmenu v rýchlosti šírenia čo zapríčiňuje okamžitú zmenu stavu polarizácie svetla. Ďalej sú popísané ich vlastnosti, výhody a typické použitie.

Piata kapitola sa venuje praktickej časti diplomovej práce, obsahuje navrhnuté schémy pre zapojenie a overenie teoretických predpokladov. Je tu zobrazený finálny návrh zapojenia a merania spolu s použitými zariadeniami a popis jednotlivých komponentov použitých v zapojení.

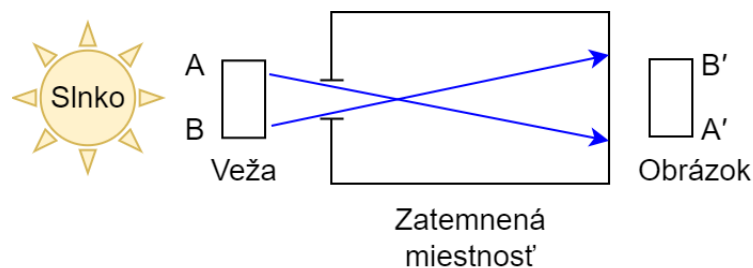
Predposledná kapitola prezentuje výsledky meraní ktoré sú realizované v rámci diplomovej práce. Táto kapitola zobrazuje popis jednotlivých meraní a ich grafické zobrazenie pri meraniach detekcie sensorického vlákna pri aplikovaní závažia rôznej hmotnosti, detekciu teplotných zmien pomocou sensorického vlákna a detekciu sensorického vlákna pomocou trhačky (proof tester) s cieľom overiť jeho detekčné schopnosti pri mechanickom namáhaní.

Posledná kapitola sa venuje diskusii k meraniam a za ňou nasleduje záver, obsahuje zhrnutie dosiahnutých výsledkov, ich popis a následne zhodnotenie celej diplomovej práce.

1 Základy teórie svetla

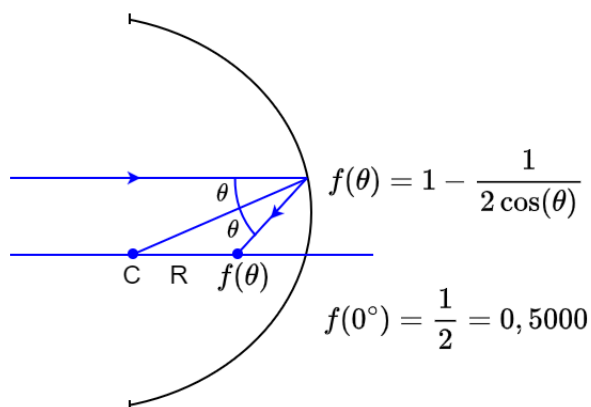
1.1 Teória svetelných lúčov

Polarizované svetlo má svoj pôvod v teórii lúčov svetla, Al – Hazen skúmal vežu cez veľmi malý otvor v zatemnenej miestnosti. Na zadnej stene sa veža javila ako prevrátený obraz. Neskôr to bolo vysvetlené spolu so zákonom odrazu ktorý bol definovaný Snellom [1, 2]. Svetlo vychádza z bodov A a B do A' a B' v uvedenom poradí vo forme lúčov ako možno vidieť na obr. 1.1.



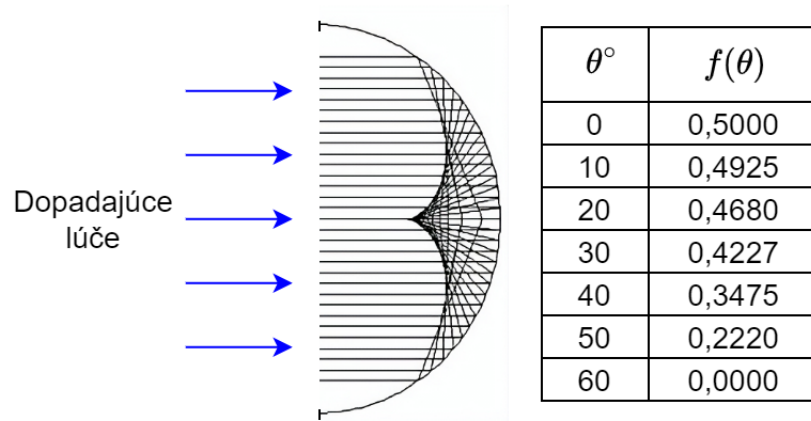
Obr. 1.1: Teória svetelných lúčov [1]

Teória lúčov sa objavuje, keď sa svetelné lúče odražajú od konkávneho sférického povrchu, ako je znázornené na obr. 1.2.



Obr. 1.2: Teória lúčov [1]

Kde C je stred kružnice, R je polomer sférického povrchu a $f(\theta)$ je ohniskom pre kružnicu s jednotkovým polomerom. Ohniskový bod sa pohybuje od $f(0^\circ) = 0,5000$ do $f(60^\circ) = 0,0000$ keď sa dopadajúci lúč vzdaluje od osi symetrie. Znázornením dráhy lúča pre $f(\theta)$ od $\theta = 0^\circ$ do 60° získame obr. 1.3. Odrazené svetelné lúče nedosahujú jedno ohnisko [1].

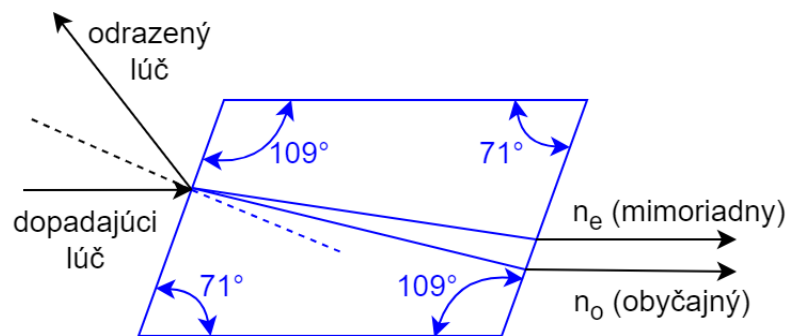


Obr. 1.3: Teória lúčov [1]

2 Polarizácia

2.1 Polarizácia svetla

Ak sa jeden lúč prirodzeného dopadajúceho svetla šíri cez kosoštvorcový kryštál kalcitu, vznikajú dva lúče, čo dokazuje že jeden lúč svetla sa v skutočnosti skladá z dvoch lúčov ktoré sa nazývajú obyčajný (n_o) alebo mimoriadny (n_e). Tieto dva lúče sa lámu pod rôznymi uhlami, nakoľko kryštál kalcitu je dvojlomný. Oba lúče sa riadia Snellovým zákonom lomu, ale majú rozdielne indexy lomu [1, 2].



Obr. 2.1: Teória lúčov [1]

Ďalší výskum ukázal že otáčaním druhého (analyzovaného) kryštálu sa intenzita prvého lúča maximalizovala a tak druhý lúč zanikol. Ďalšie otočenie o 90° ukázalo že prvý lúč sa opäť objavil s maximálnou intenzitou a druhý lúč zanikol. Ak bol uhol natočený na 45° tak sú intezity obidvoch lúčov rovnaké. Kvôli tomuto opačnému správaniu intenzity sa hovorí že tieto dva lúče sú polarizované. Toto znamená že jeden lúč prirodzeného svetla sa v skutočnosti skladá z dvoch nezávislých opačne polarizovaných lúčov. O týchto lúčoch sa hovorí že predstavujú polarizačné stavy s a p [1].

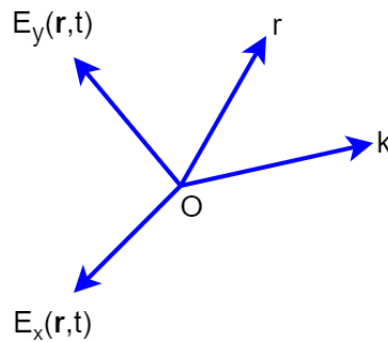
2.2 Fresnelova teória vln

Teória svetla známa ako Fresnelova vlnová teória vysvetlila tri hlavné svetelné javy, interferenciu, difrakciu a polarizáciu. Optické pole pozostáva iba z dvoch ortogonálnych zložiek v rovine priecnej k smeru šírenia. Fresnelova vlnová teória predpokladala že ortogonálne komponenty boli $u_1(r, t)$ a $u_2(r, t)$ ktoré boli nazvané ako optické poruchy. Tieto optické poruchy sú reprezentované elektrickými zložkami elektromagnetického poľa. Bolo predpokladané že zložky poľa sú opísané pomocou dvoch známych rovníc ktoré sa nazývajú vlnové rovnice [1, 3]:

$$\nabla^2 E_x(r, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_x(r, t)}{\partial t^2}, \quad (2.1)$$

$$\nabla^2 E_y(r, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y(r, t)}{\partial t^2}, \quad (2.2)$$

kde $E_x(r, t)$ a $E_y(r, t)$ sú zložky optického poľa, r je vektor polomeru k bodu v priestore meraný od počiatku súradnicového systému, t je čas, v je rýchlosť vlnenia a ∇^2 je Laplaceov operátor [1]. Dve zložky poľa a smer k tvoria ortogonálnu sústavu ako je znázornené na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Ortogonálna sústava [1]

Riešenia vlnových rovníc sú [1]:

$$E_x(r, t) = E_{0x} \cos(\omega t - k \cdot r + \delta_x) \quad (2.3)$$

a

$$E_y(r, t) = E_{0y} \cos(\omega t - k \cdot r + \delta_y), \quad (2.4)$$

kde k je (vektorové) vlnové číslo ktoré opisuje smer šírenia a r je bod v poli. V praxi sa za smerovanie poľa považuje smerovanie pozdĺž osi z . Uvedené dve zložky potom možno zapísať ako [1]:

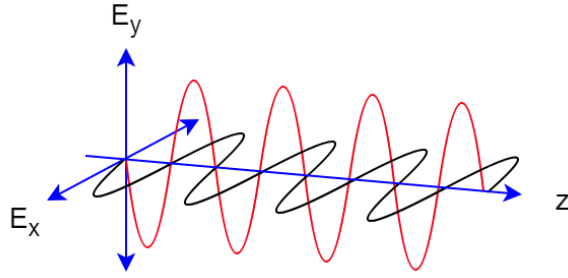
$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \quad (2.5)$$

a

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y), \quad (2.6)$$

kde $\omega = 2\pi f$ je uhlová frekvencia $k = 2\pi/\lambda$ je veľkosť vlnového čísla, E_{0x} a E_{0y} sú maximálne amplitúdy, δ_x a δ_y sú ľubovoľné fázy. Výraz $\omega t - kz$ sa nazýva propagátor [1].

Šírenie týchto dvoch vln (rovníc) možno graficky znázorniť ako na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Grafické znázornenie šírenia dvoch vln [1]

Zložka E_x je kolmá na rovinu a nazýva sa ako polarizačná zložka s (kolmá). Podobne zložka E_y je v rovine a nazýva sa polarizačná zložka p (paralelná) [1].

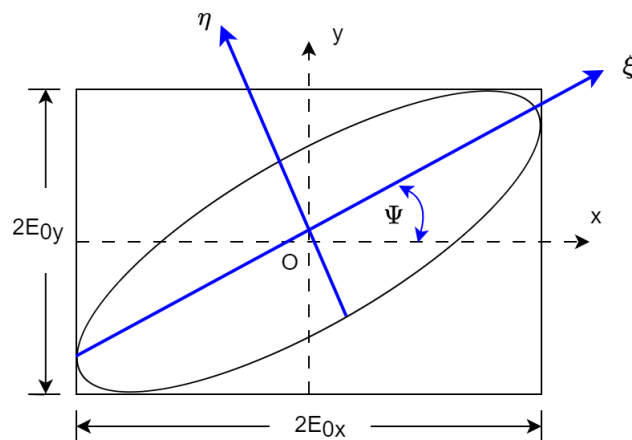
2.3 Polarizačná elipsa

Podľa Fresnelovej teórie $E_x(z, t)$ a $E_y(z, t)$ možno opísať sinusové oscilácie v rovinách $x - z$ a $y - z$, vylúčením časopriestorového propagátora $\omega t - kz$ medzi týmito dvomi rovnicami vedie k rovnici elipsy [1]:

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (2.7)$$

kde $\delta = \delta_y - \delta_x$.

Rovnica 2.7 opisuje elipsu v jej neštandardnej podobe. Keďže sa rovnica vzťahuje na polarizované svetlo, nazýva sa polarizačná elipsa. V rovnici je časopriestorový propagátor explicitne vylúčený. Napriek tomu zložky poľa $E_x(z, t)$ a $E_y(z, t)$ sú naďalej závislé od času a priestoru [1, 3]. Graf neštandardnej polarizačnej elipsy je uvedený na obr. 2.4.



Obr. 2.4: Grafické znázornenie polarizačnej elipsy [1]

Na obrázku je znázornený aj otočený súradnicový systém $\eta - \xi$. Vzhľadom na amplitúdy E_{0x} , E_{0y} a fázú δ ktoré sú konštantné, polarizačná elipsa zostáva fixovaná ako sa polarizovaný lúč šíri [1].

2.3.1 Parametre polarizačnej elipsy

Polarizačná elipsa sa dá vyjadriť pomocou dvoch uhlových parametrov [1]:

- Orientačný uhol Ψ ($0 \leq \Psi \leq \pi$)
- Eliptický uhol χ ($-\pi/4 < \chi \leq \pi/4$).

Tieto uhly môžu byť definované pomocou parametrov polarizačnej elipsy [1]:

$$\tan 2\Psi = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \cos \delta, \quad 0 \leq \Psi \leq \pi, \quad (2.8)$$

$$\sin 2\chi = \frac{2E_{0x}E_{0y} \sin \delta}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}, \quad -\pi/4 < \chi \leq \pi/4. \quad (2.9)$$

Pravú stranu oboch rovníc tvoria algebraické a trigonometrické členy. Tieto dve rovnice je možné úplne prepísať v trigonometrických podmienkach zavedením uhla známeho ako pomocný uhol α definovaný ako [1]:

$$\tan \alpha = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}, \quad 0 \leq \alpha \leq \pi/2. \quad (2.10)$$

Čo vedie k čisto goniometrickým rovniciam [1]:

$$\tan 2\Psi = (\tan 2\alpha) \cos \delta, \quad (2.11)$$

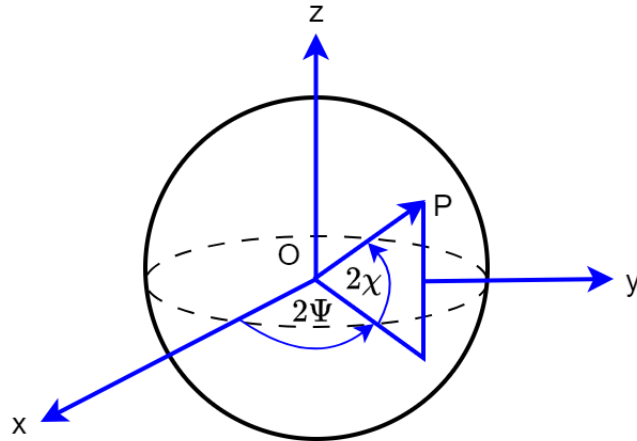
$$\sin 2\chi = (\sin 2\alpha) \sin \delta. \quad (2.12)$$

Podmienky pre uhly sú $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ a $0 \leq \delta < 2\pi$.

2.4 Poincarého guľa

Samotná polarizačná elipsa je vynikajúcim spôsobom ako vizualizovať polarizované svetlo. Avšak okrem degenerovaných polarizačných stavov je prakticky nemožné určiť orientáciu a uhly elipticity zobrazenia polarizačnej elipsy. Samotné výpočty potrebné na určenie nových uhlov polarizovaného lúča ktorý sa šíri cez jeden alebo viac polarizačných prvkov sú náročné a zdĺhavé [1, 4, 5].

Pre túto problematiku bola navrhnutá guľa, ktorá je známa ako Poincaréova, slúži na znázornenie polarizovaného svetla. Nasledujúci obr. 2.5 znázorňuje Poincarého guľu a jej sférické a karteziánske súradnice [1].



Obr. 2.5: Poincarého guľa [1]

Kde x, y a z sú Karteziánske súradnicové osi, Ψ a χ sú uhly sférickej orientácie a elipticity (polarizačnej elipsy) a P je bod na povrchu gule. Na guľi sú uhly vyjadrené ako 2Ψ a 2χ . Pre jednotkovú guľu sú karteziánske súradnice vzťahujú na sférické súradnice pomocou rovnice [1]:

$$x = \cos(2\chi) \cos(2\Psi), 0 \leq \Psi < \pi, \quad (2.13)$$

$$y = \cos(2\chi) \sin(2\Psi), -\pi/4 < \chi \leq \pi/4 \quad (2.14)$$

$$z = \sin(2\chi), \quad (2.15)$$

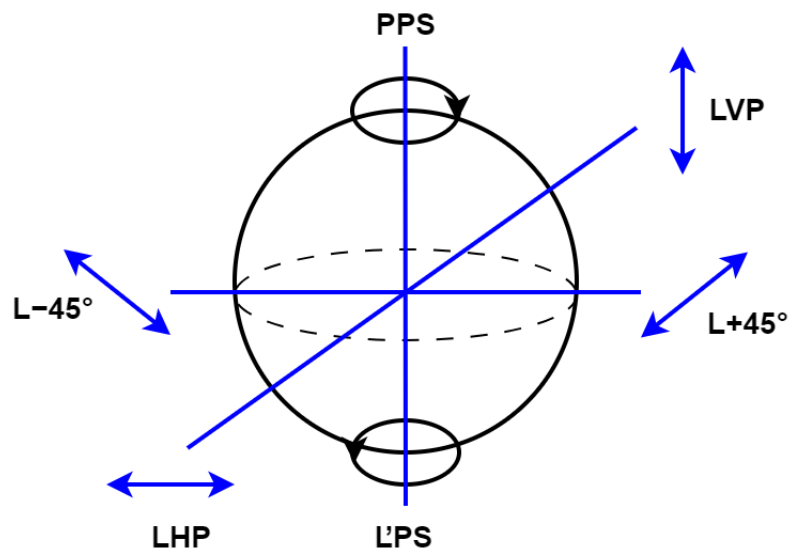
kde $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ pre guľu s jednotkovým polomerom.

2.4.1 Degenerované polarizačné stavy na Poincarého guľi

Z predchádzajúcich rovníc vyplýva, že akýkoľvek stav polarizácie môže byť reprezentovaný súradnicovou dvojicou 2Ψ a 2χ . Degenerované polarizačné stavy na Poincarého guľi sú [1, 5]:

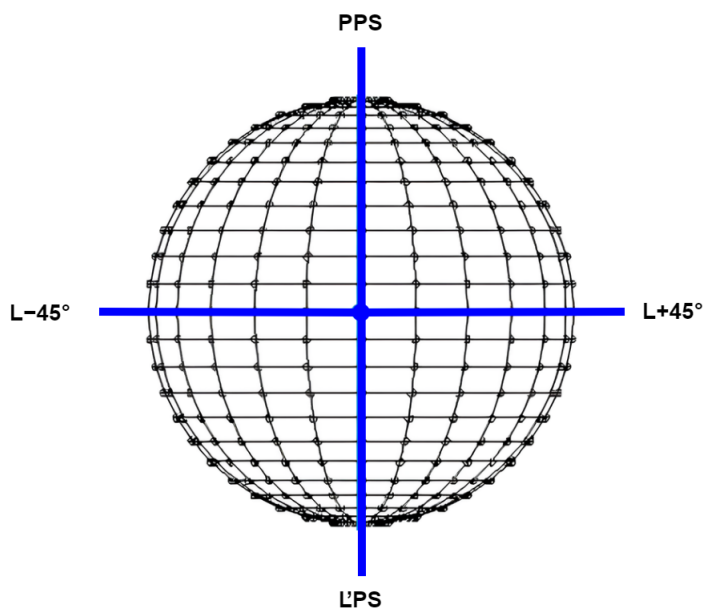
- LHP ($0^\circ, 0^\circ$)
- LVP ($180^\circ, 0^\circ$)
- PPS ($0^\circ, +90^\circ$)
- EPS ($0^\circ, -90^\circ$)
- $L - 45^\circ$ ($270^\circ, 0^\circ$)
- $L + 45^\circ$ ($+90^\circ, 0^\circ$)

Degenerované polarizačné stavy na Poincarého guľi sú zobrazené na obr. 2.6. Všetky stavy lineárnej polarizácie ležia na rovníku a stavy pravotočivej a ľavotočivej kruhovej polarizácie sú na severe a juhu. Elipticky polarizované stavy sú zastúpené na povrchu gule [1, 4, 5].



Obr. 2.6: Poincarého guľa s degenerovanými polarizačnými stavmi [1, 5]

Na obr. 2.7 sú znázornené polarizačné stavy pri v každom priesečníku $7,5^\circ$ zemepisnej šírky a 15° zemepisnej dĺžky.



Obr. 2.7: Poincarého guľa s polarizačnými stavmi s priesečníkmi [1]

2.5 Stokesove polarizačné parametre

Poincarého guľa a polarizačná elipsa majú obmedzenie, polarizačná elipsa je okamžitým zobrazením polarizovaného svetla a uhol natočenia Ψ ani uhol elipticity χ

nie je priamo merateľný. Na prekonanie týchto obmedzení je potrebné určiť merateľné veličiny polarizovaného poľa, čo možno dosiahnuť pomocou časového priemeru polarizácie elipsy [1, 4]:

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (2.16)$$

Časový priemer je definovaný ako [1]:

$$\langle E_i(z, t)E_j(z, t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_i(z, t)E_j(z, t)dt, \quad i, j = x, y, \quad (2.17)$$

Kde T je celkový čas priemerovania. Aplikovaním definície časového priemeru na polarizačnú elipsu potom vznikne nasledujúca rovnica [1]:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (2.18)$$

kde

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \quad (2.19)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \quad (2.20)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta, \quad (2.21)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta, \quad \delta = \delta_y - \delta_x. \quad (2.22)$$

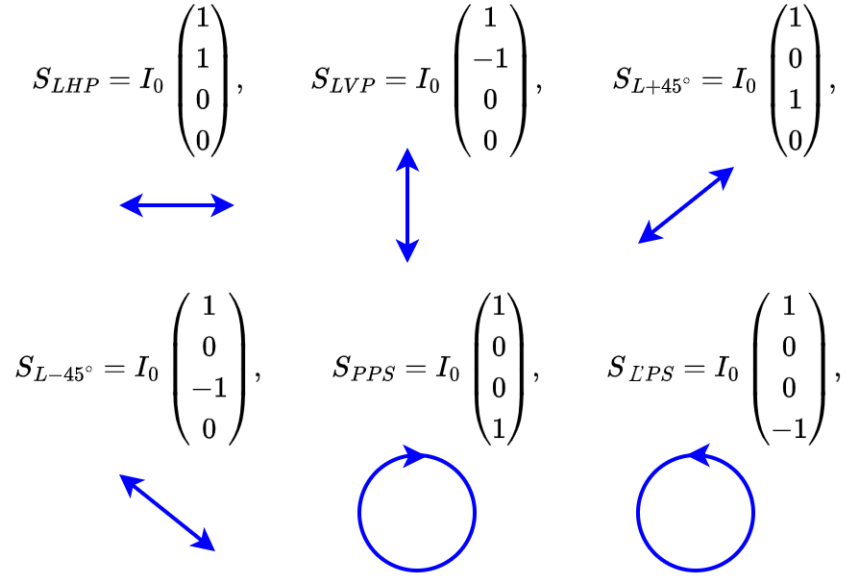
Veličiny S_0, S_1, S_2 a S_3 sú pozorovateľné veličiny polarizovaného poľa. Zaviedol ich Stokes a nazývajú sa Stokesove polarizačné parametre [1].

Prvý Stokesov parameter S_0 opisuje celkovú intenzitu optického lúča, druhý parameter S_1 opisuje prevahu svetla LHP nad svetlom LVP, tretí parameter S_2 opisuje prevahu svetla $L + 45^\circ$ nad svetlom $L - 45^\circ$ a na záver parameter S_3 opisuje prevahu svetla PPS nad svetlom LPS [1].

Stokesove parametre je vhodné usporiadať do stĺpcovej matice, ktorá sa označuje ako Stokesov vektor pre elipticky polarizované svetlo [1, 4]:

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Stokesove vektory pre degenerovanú polarizáciu sa dajú ľahko zistiť pomocou predchádzajúcich definícií a rovníc ako je zobrazené na obr. 2.8.



Obr. 2.8: Stokesove vektory pre degenerovanú polarizáciu [1]

Kde I_0 je intenzita a veľmi často sa normalizuje na jednotku. Je možné ukázať že Stokesove parametre súvisia s uhlom orientácie a elipticity, Ψ a χ spojenými s Poincarého guľou takto [1]:

$$S_1 = S_0 \cos(2\chi) \cos(2\Psi), \quad (2.24)$$

$$S_2 = S_0 \cos(2\chi) \sin(2\Psi), \quad (2.25)$$

$$S_3 = S_0 \sin(2\chi), \quad (2.26)$$

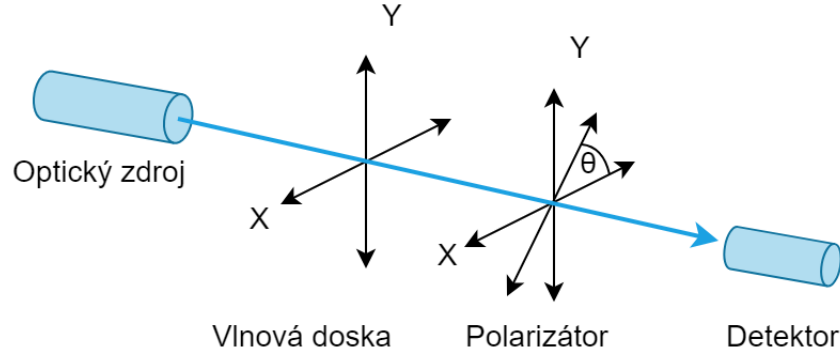
a

$$\Psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right), \quad 0 \leq \Psi \leq \pi, \quad (2.27)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{S_3}{S_0} \right), \quad -\frac{\pi}{4} \leq \chi \leq \frac{\pi}{4}. \quad (2.28)$$

2.5.1 Meranie Stokesových parametrov

Štyri Stokesove parametre polarizovaného lúča možno merať postupným prechodom lúča cez dva polarizačné prvky známe ako vlnová doska a polarizátor. Vznikajúci lúč potom dopadá na optický detektor [1, 6]. Schéma pre meranie je znázornená na obr. 2.9.



Obr. 2.9: Meranie Stokesových parametrov [1, 6]

Pri meraní vlnová doska zavádza fázu ϕ medzi ortogonálnymi zložkami dopadajúcej vlny optického lúča. Polarizátor potom prenáša výsledné pole pozdĺž svojej prenosovej osi pod uhlom θ a intenzita $I(\theta, \phi)$ na detektore je potom [1]:

$$I(\theta, \phi) = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta \cos \phi - S_3 \sin 2\theta \sin \phi]. \quad (2.29)$$

Stokesove parametre v rovnici 2.29 sú parametre dopadajúceho lúča. Otáčaním polarizátora $\theta = 0, \pi/4$ a $\pi/2$ bez štvrtiny vlnovej dosky a následným vložením vlnovej dosky do konečného merania sa Stokesove polarizačné parametre dopadajúceho lúča zistia z uvedenej rovnice [1]:

$$S_0 = I(0, 0) + I(\pi/2, 0), \quad (2.30)$$

$$S_1 = I(0, 0) - I(\pi/2, 0), \quad (2.31)$$

$$S_2 = 2I(\pi/4, 0) - S_0 \quad (2.32)$$

a

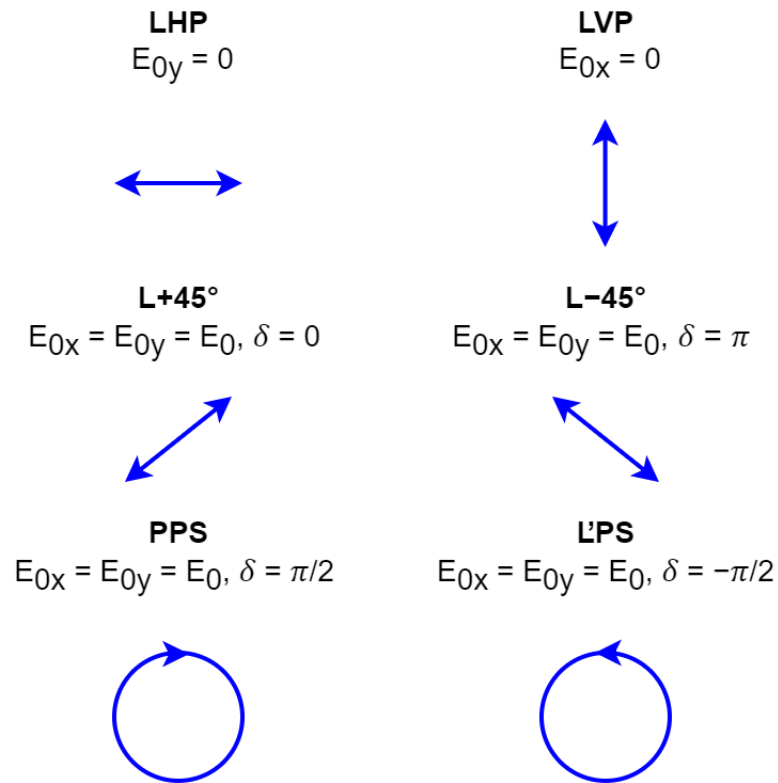
$$S_3 = S_0 - 2I(\pi/4, \pi/2). \quad (2.33)$$

2.6 Degenerované polarizačné stavy

Vo všeobecnosti je optické pole elipticky polarizované, ale existuje niekoľko kombinácií amplitúdy a fázy, ktoré sú obzvlášť dôležité. Tieto polarizačné stavy sú rozdelené na [1]:

- Lineárne horizontálne/vertikálne polarizované svetlo (LHP/LVP)
- Lineárne $\pm 45^\circ$ polarizované svetlo ($L + 45^\circ/L - 45^\circ$)
- Pravotočivé/ľavotočivé polarizované svetlo (PPS/LPS)

Polarizačné stavy spolu s matematickými podmienkami sú zobrazené na obr. 2.10.

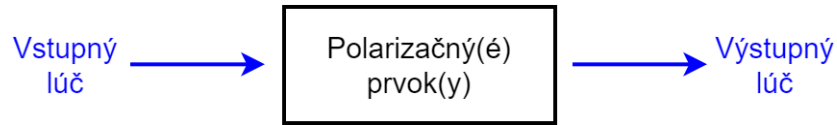


Obr. 2.10: Polarizačné stavy [1]

Pravotočivé polarizované svetlo sa otáča v smere hodinových ručičiek a ľavotočivé polarizované svetlo sa otáča proti smeru hodinových ručičiek. Tieto polarizačné stavy sú dôležité, dajú sa relatívne ľahko vytvoriť v laboratórnom prostredí a to pomocou lineárnych kruhových polarizátorov. Polarizačné merania ako aj mnohé ďalšie výpočty polarizácie sú výrazne zjednodušené použitím týchto špecifických polarizačných stavov, to platí najmä vtedy keď sa polarizovaný lúč šíri mnohými polarizujúcimi prvkami [1].

2.7 Muellerova matica

Vo všeobecnosti má polarizačná elipsa neštandardný tvar. Polarizačnú elipsu (stav polarizácie) možno meniť zmenou amplitúdy, fázy alebo otáčaním elipsy. Na tento účel sú k dispozícii polarizačné materiály. Polarizovaný lúč s daným stavom polarizácie sa šíri cez jeden alebo viac polarizačných prvkov, kde lúč získava nový polarizačný stav [1]. Tento proces je znázornený na obr. 2.11.



Obr. 2.11: Šírenie lúča cez polarizačné prvky [1]

Vstupný lúč je charakterizovaný Stokesovým vektorom S a výstupný lúč S' . Predpokladá sa, že S a S' sú lineárne prepojené transformačnou maticou 4×4 známou ako Muellerova matica, ktorá predstavuje polarizačný(é) prvok(y) [1]:

$$\begin{pmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}. \quad (2.34)$$

Všetky prvky v Muellerovej matici 4×4 sú reálne veličiny. Maticový vzťah možno zapísať ako [1]:

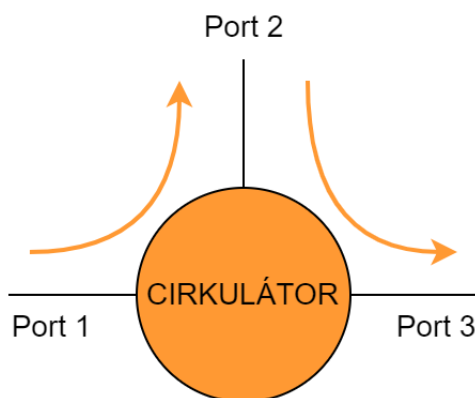
$$S' = M \cdot S \quad (2.35)$$

Na zmenu troch parametrov elipsy (ortogonálnych amplitúd a fázy) sú potrebné len dva polarizačné prvky. Amplitúdu možno zmeniť pomocou polarizačného prvku známeho ako polarizátor. Podobne fázu optického lúča možno meniť pomocou vlnovej dosky. Polarizačnú elipsu možno meniť otáčaním pomocou prvku nazývaného rotátor. Pomocou týchto troch polarizačných prvkov možno dosiahnuť akýkoľvek eliptický stav polarizácie [1].

3 Optovláknové komponenty

3.1 Optovláknové cirkulátory zachovávajúce polarizáciu

Optické cirkulátory so zachovávaním polarizácie (PM) sú nerecipročné, jednosmerné, trojportové zariadenia ktoré sa využívajú v širokej škále optických riešení. Tieto cirkulátory sú k dispozícii so stredovou vlnovou dĺžkou 1064 nm a 1310 nm (O – pásmo) alebo 1550 nm (C – pásmo), pre rýchlu osu sú blokované a sú určené na prácu so svetlom ktoré je pustené do pomalej osi. Existuje viacero variant týchto cirkulátorov, z hľadiska konektorov sa jedná o cirkulátory bez konektoru, s konektormi FC/PC alebo s konektormi FC/APC. Taktiež existujú aj jednovidové optické cirkulátory [8, 9]. Základná schéma cirkulátora je zobrazená na obr. 3.1.

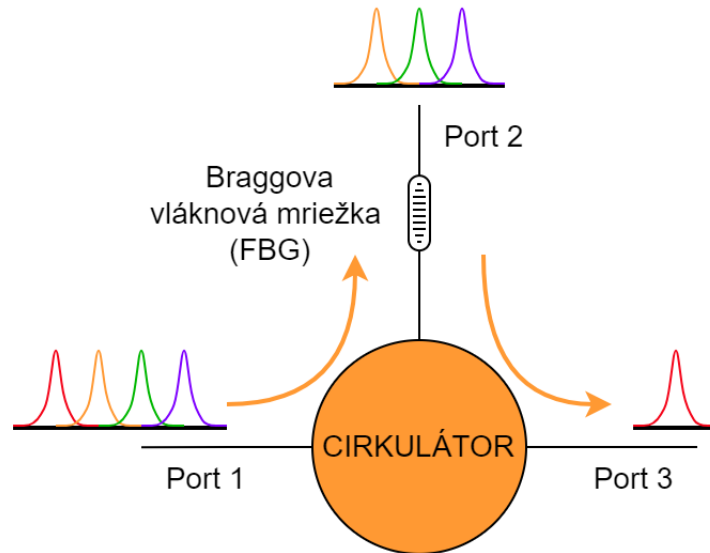


Obr. 3.1: Základná schéma cirkulátora [8, 9]

Optický cirkulátor je obdobou elektronickej cirkulácie nakoľko z hľadiska funkcií sú veľmi podobné. Optický cirkulátor je trojportové zariadenie, ktoré umožňuje svetlu pohybovať sa len jedným smerom. Signál ktorý vstupuje do portu 1 vyjde z portu 2 s minimálnymi stratami, zatiaľ čo signál vstupujúci do portu 2 vyjde z portu 3 s minimálnymi stratami. Svetlo vstupujúce do portu 2 má veľké straty v porte 1 a svetlo vstupujúce do portu 3 má veľké straty v portoch 1 a 2. Jedná sa o zariadenie nerecipročné, čo znamená že akékoľvek zmeny vlastností svetla spôsobené prechodom cez zariadenie sa nezvrátia, ak prechádza opačným smerom. Vďaka vysokej izolácii a nízkym vložným stratám sa optické cirkulátory široko využívajú v moderných komunikačných systémoch ako multiplexory s prídavným výstupom a na kompenzáciu chromatickej disperzie [8, 9].

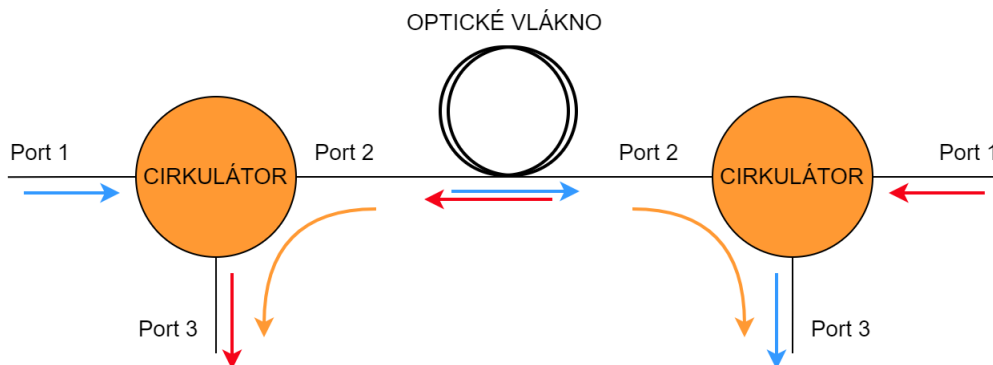
Na obr. 3.2 je znázornené použitie cirkulátora pre optický kanál so systémom DWDM pomocou FBG (Fiber Bragg Grating). Vstupné kanály DWDM sú pripo-

jené do portu 1 zariadenia so zariadením FBG pripojeným k portu 2. Vlnová dĺžka odrazená od FBG potom opäť vstupuje do cirkulátora v porte 2 a podľa toho sa smeruje do portu 3. Zvyšné signály prechádzajú cez FBG a vychádzajú na vrchnom vlákne [8].



Obr. 3.2: Použitie cirkulátora so systémom DWDM pomocou FBG [8]

Cirkulátory sa môžu používať aj na posielanie optického signálu v dvoch smeroch po jednom vlákne. Cirkulátor je umiestnený na oboch koncoch vlákna. Každý cirkulátor funguje tak, že pridáva signál v jednom smere a zároveň odstraňuje signál v druhom smere [8]. Tento cirkulátor je zobrazený na obr. 3.3



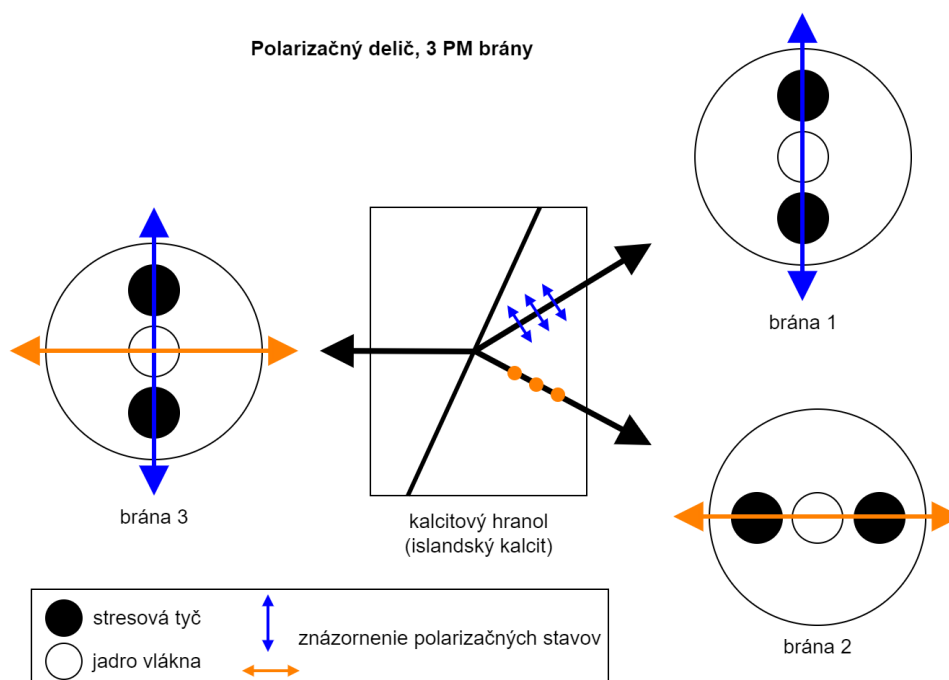
Obr. 3.3: Zapojenie cirkulátora v dvoch smeroch po jednom vlákne [8]

3.2 Delič polarizácie

Delič polarizácie (taktiež polarizační delič, Polarization – Maintaining Fiber – Based Polarization Beam Splitters – PBS) alebo zlučovač (Combiners – PBC) je navrhnutý tak, aby kombinoval dve ortogonálne polarizácie do jedného vlákna alebo aby rozdeľoval jeden vstup na jeho ortogonálnu lineárnu polarizáciu pomocou dvoch výstupov vlákna [10].

Zariadenie obsahuje tri úseky vlákna ktoré zachovávajú polarizáciu, jedno rameno (brána 3) je na jednej strane kalcitového hranolu a dve ramená (brány 1 a 2) sú na druhej strane kalcitového hranolu. Je vyžadované aby všetky tri ramená boli vyrobené z vlákien ktoré zachovávajú polarizáciu, pričom brána 1 je orientovaná do pomalej osi a brána 2 do rýchlej osi brány 3 [10].

Ak je polarizovaný lúč zarovnaný na pomalú os vlákna na bráne 3, ako to znázorňujú modré šípky na obr. 3.4 potom sa tento lúč vychýli tak že vystupuje z brány 1 s polarizáciou zarovnanou do pomalej osi. Naopak, ak je lúč vstupujúci do brány 3 zarovnaný s rýchlou osou ako znázorňujú oranžové šípky, potom bude svetlo vychýlené hranolom tak, aby vychádzalo z brány 2 so svetlom zarovnaným na pomalú os. Pomalé osi vlákien na bráne 1 a 2 sú navzájom kolmé, aby zodpovedali polarizácii vyžarovanej kalcitovým hranolom. Ak polarizácia dopadajúca na bránu 3 zvierá uhol vzhľadom na osi, tak výstup na bráne 1 a 2 sa bude meniť v závislosti od uhla dopadajúceho polarizačného stavu [10].



Obr. 3.4: Princíp činnosti deliča polarizácie (ThorLabs PBC980PM-FC) [10]

Tento PBS možno použiť aj v opačnom smere. Svetlo dopadajúce na bránu 1 pozdĺž pomalej osi vystupuje z brány 3 ktorá je zarovnaná na pomalú os a svetlo ktoré dopadá na bránu 2 s polarizáciou zarovnanou na pomalú os bude vychádzať z brány 3 s polarizáciou zarovnanou na rýchlu os. Naopak svetlo ktoré dopadá na brány 1 a 2 s polarizáciou zarovnanou na rýchlu os vlákien sa bude cez hranol lámať inak a nebude vychádzať z brány 3. Tieto zariadenia sa využívajú pre zlučovanie svetla z dvoch laserových púmp do jedného vlákna, napríklad u vláknových zosilňovačov dopovaných erbiom alebo ramanovských zosilňovačov [10].

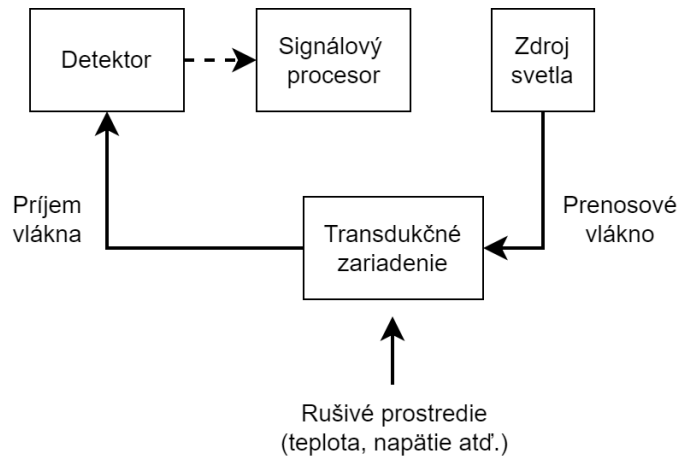
3.3 Úvod do optických vláknových senzorov

Snímanie sa stalo kľúčovou technológiou v mnohých oblastiach ako je zdravotníctvo, doprava a mnohé priemyselné technológie. V mnohých takýchto pokročilých aplikáciách, kde je dôležitá miniaturizácia, citlivosť a diaľkové meranie môžu techniky snímania založené na optických vláknach poskytnúť nové riešenia. V dôsledku toho sa technológia snímania pomocou optických vlákien vyvinula ako výkonná a bohatá technológia, ktorá sa v súčasnosti implementuje v širokej škále aplikácií [11].

Vďaka rýchlemu rozvoju komunikačných systémov s optickými vláknami sa výrazne znížili aj náklady na optické vláknové senzory vďaka komerčne využiteľným kľúčovým komponentom, ako sú zdroje svetla a fotodetektory. Očakáva sa, že výskum tejto technológie bude naďalej pokračovať a technológia sa rozšíri. Postupne sa objavuje niekoľko nových typov vláknových senzorov, technológie vláknových senzorov sú vyspelé, komerčne sa vyrábajú a používajú v rôznych aplikáciách [11].

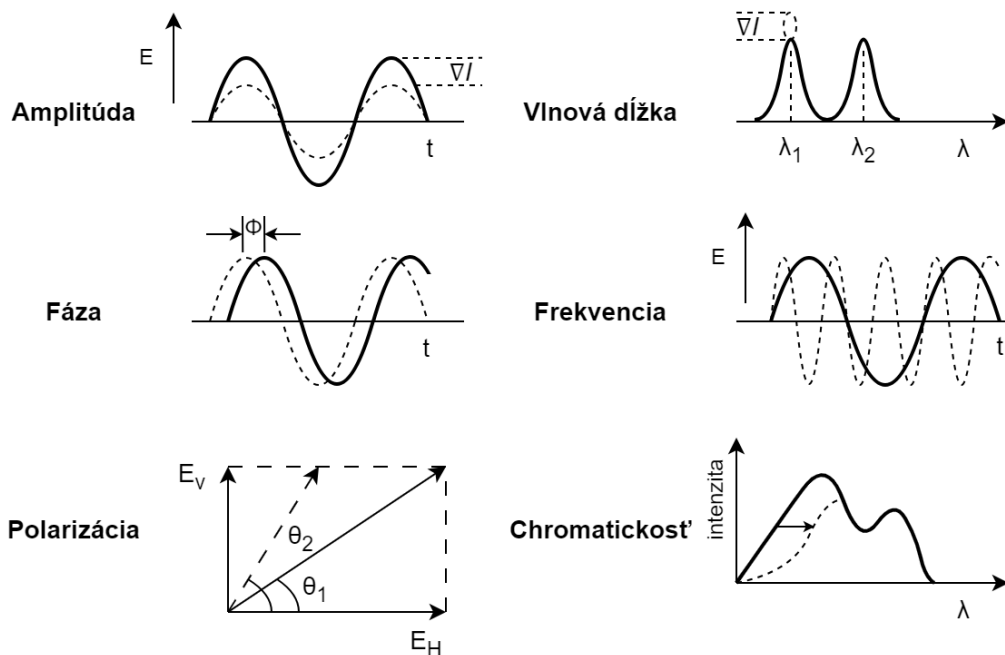
3.4 Optické vláknové senzory

Optické vlákna hrajú dôležitú úlohu v mnohých aplikáciách okrem komunikácie sa používajú pre snímanie a riadenie. Optické vlákna významne ovplyvnili tieto oblasti a naďalej sú predmetom rozsiahleho výskumu. Vo všeobecnosti sú vlákna citlivejšie a náchylnejšie na vonkajšie vplyvy, ktoré by mohli spôsobiť neúčinnosť telekomunikačných vlákien [12, 13]. V najjednoduchšej forme sa optický vláknový senzor skladá zo zdroja svetla, optického vlákna, snímača a detektora ako možno vidieť na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Základné prvky optického senzora [12]

Princíp činnosti optického senzora spočíva v tom, že snímací prvok moduluje niektoré parametre optického systému (intenzita, vlnová dĺžka, polarizácia, fáza atď.). To vedie k zmene vlastností optického signálu prijatého na detektore [12]. Na obr. 3.6 sú zobrazené rôzne zmeny, ktoré možno vniesť do svetla putujúceho pozdĺž vlákna.



Obr. 3.6: Efekty modulácie svetla používané optickými senzormi na detekciu fyzikálnych parametrov [12]

Optický senzor môže ovplyvniť jednu alebo viacero svetlovodných charakteristík prenosového vlákna a korelovať konkrétny požadovaný parameter (napr. teplotu, napätie, tlak, chemické zložky atď.) s týmito konkrétnymi zmenami svetla. Základným

princípom je teda meranie vonkajšieho fyzikálneho parametra vyvolaním zmien v jednej alebo viacerých optických vlastnostiach svetelného lúča, ktorý sa pohybuje vo vnútri optického vlákna a pozdĺž neho. Vlákno je teda snímacím prvkom aj prenosovým médiom. Optické senzory predstavujú technologickú pokrok, ktorý možno použiť na množstvo snímacích aplikácií [12].

Väčšina fyzikálnych vlastností sa dá opticky snímať pomocou vlákien. Svetlo intenzita, posun (poloha), teplota, tlak, rotácia, zvuk, napätie, magnetické pole, elektrické pole, žiarenie, prietok, hladina kvapaliny, chemická analýza a vibrácie sú len niektoré z javov, ktoré možno snímať [12]. V tab. 3.1 sú uvedené senzory pre rôzne aplikácie.

| Aplikácie | Senzor |
|--|---|
| Automatizované výrobné linky (oceľ, papier atď.) | Poloha, hrúbka, koncový spínač, detekcia prerušenia, rýchlosť |
| Riadenie procesov | Teplota, tlak, prietok, chemická analýza |
| Automobilový priemysel | Teplota, tlak, krútiaci moment, detekcia plynov, zrýchlenie |
| Obrábacie stroje | Posunutie, detekcia zlomeniny nástroja |
| Letectvo | Teplota, tlak, posun, rotácia, napätie, hladina kvapaliny |
| Inteligentné štruktúry | Teplota, statická a dynamická deformácia |
| Petrochemický priemysel | Horľavé a toxické plyny, detekcia úniku, hladina kvapalín |
| Armáda, Vnútoraná bezpečnosť | Zvuk, rotácia, žiarenie, vibrácie, poloha, teplota, tlak, chemikálie, biotoxíny |
| Energia, ropa a plyn | Teplota, tlak, prietok |
| Veterná a geotermálna energia | Napätie, teplota |
| Biomedicína | Teplota, tlak, biotoxíny, chemikálie |

Tab. 3.1: Senzory pre rôzne aplikácie [12]

Optické senzory sa klasifikujú ako vnútorné alebo vonkajšie. Ak modulácia prebieha priamo vo vlákne, ide o vnútorný senzor. Ak sa modulácia vykonáva pomocou externého snímača tak je proces snímání vonkajší [12, 13].

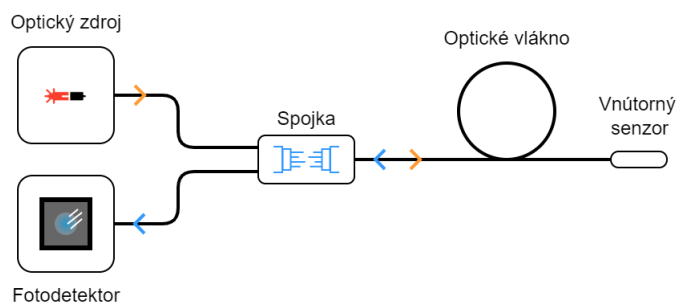
V minulosti sa aplikácie využívajúce optické vlákna orientovali na veľmi jednoduché snímače, ako sú čítačky kariet pre počítače a indikátory výpadkov na určenie, či sú svetlá v automobiloch vypnuté. Z hľadiska technológie sa optické snímače posunuli oveľa ďalej a sú využívané v širokej škále pre rôzne druhy snímání a detekcie. Boli vyvinuté ultrasofistikované senzory využívajúce interferometrické techniky a sú široko používané. V porovnaní s bežnými snímačmi posunu tieto zariadenia majú o štyri až päť rádov vyššie rozlíšenie. Vo všeobecnosti sa takáto vysoká citlivosť pre väčšinu aplikácií nevyžaduje, výnimkou sú vojenské aplikácie, hydrofóny a gyroskopy [12].

Optické vláknové senzory sú elektromagneticky pasívne. Táto vlastnosť je veľmi

dôležitá, pretože umožňuje použitie optických sensorov tam, kde nie je možné použiť iné typy sensorov, napríklad v prostrediach s vysokým a premenlivým elektrickým poľom, kde dochádza k nebezpečenstvu výbuchu. Okrem toho zlúčenina oxidu kremičitého, ktorá je základným transdukčným materiálom optického vlákna a je odolná voči väčšine chemických a biologických látok. Ďalšou výhodou je, že optické vláknové senzory sú ľahké a malé [14].

Vnútorne senzory priamo používajú optické vlákno ako citlivý materiál a tiež ako médium na prenos optického signálu s meranou informáciou. Vnútorný senzor je zobrazený na obr. 3.7. Fungujú prostredníctvom priamej modulácie svetla vedeného do optického vlákna. V tomto type senzora fyzikálne poruchy menia vlastnosti optického vlákna, čím sa menia vlastnosti svetla prenášaného vláknom. Prípadne sa modulované svetlo môže spojiť späť do rovnakého vlákna odrazom alebo rozptylom a potom je vedené späť do detekčného systému. Najjednoduchšie vláknové senzory menia intenzitu svetla a vyžadujú len zdroj svetla a detektor [14].

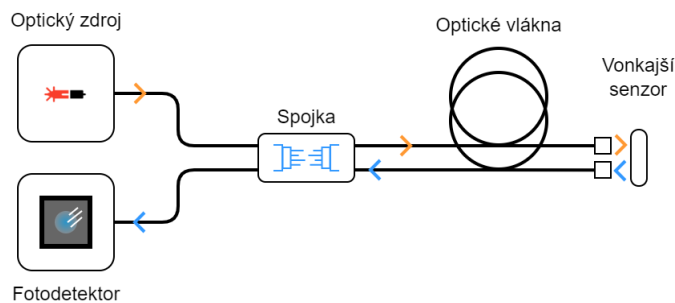
Vnútorne optické vláknové senzory sa môžu použiť pri distribuovanom snímaní na veľké vzdialenosti na meranie rôznych parametrov, teplotu možno merať analýzou Ramanovho rozptylu optického vlákna alebo použitím vlákna s evanescenčnými stratami, ktoré sa menia s teplotou. Elektrické napätie možno merať analýzou polarizácie svetla ako funkcie napätia alebo elektrického poľa s ohľadom na nelineárne optické efekty v špeciálne dopovaných vláknach. Uhly možno merať pomocou Sagnacovho efektu a smer je možné rozpoznať pomocou špeciálnej dlhoperiodickej vláknovej mriežky. Výhodou týchto snímačov je, že môžu súčasne merať teplotu a akustický tlak na tom istom mieste. To je užitočné najmä pri získavaní informácií z malých zložitých štruktúr. V ropných vrtoch sa na presné meranie teploty a tlaku používajú vlastné optické vláknové snímače. Súčasné snímanie teploty a napätia na veľké vzdialenosti je možné aj skúmaním Brillouinovho rozptylu, ktorý umožňuje snímanie na väčšie vzdialenosti. Ďalšie využitie týchto sensorov je v zdravotníctve na lekárske zobrazovanie a diagnostiku, vďaka ich vyššej odolnosti voči chemickým látkam a odolnosti voči elektromagnetickému rušeniu. [14].



Obr. 3.7: Vnútorný optický vláknový senzor [14]

Vonkajšie senzory taktiež nazývané hybridné optické vláknové senzory (zvyčajne založené na multimódovom vlákne) ktoré vedie svetlo do alebo z miesta, kde sa nachádza hlava optického senzora. Sensorová hlava je externá k optickému vláknu a je založená na miniatúrnych komponentoch, ktoré sa používajú na moduláciu vlastností svetla v reakcii na zmeny prostredia spojené s fyzikálnymi poruchami. Optická energia sa prenáša do hlavy senzorov z jedného konca vlákna a druhý koniec vlákna je modulovaný a pripojený k optickému senzoru [14]. Vonkajšie senzory sú zobrazené na obr. 3.8.

V tomto type senzoru sa optické vlákno jednoducho používa na vedenie svetla do a z miesta, kde je umiestnená hlava optického senzora. Typická konfigurácia je jedno vlákno na prenos do hlavy senzora a druhé vlákno na vedenie modulovaného svetla späť do optického detektora. Tento typ senzora možno použiť na miesta, ktoré iné spôsoby prenosu nedokážu, napríklad vo vnútri prúdového motora lietadla na meranie teploty alebo v miestach s extrémnymi elektromagnetickými poľami. Vonkajšie senzory sa používajú na meranie vibrácií, rotácie, posunutia, rýchlosti, zrýchlenia, krútiaceho momentu a teploty. Poskytujú odolnosť voči šumu a poškodeniu signálu, avšak integrácia s inými typmi senzorov môže byť ťažká, pretože iné senzory produkujú elektrický výstup, ktorý sa potom musí previesť na optický signál. Fabry – Perotove interferometre sú príkladom vonkajších senzorov ktoré majú na konci vlákna dutinu, odkiaľ vychádza svetlo a umožňujú snímať množstvo parametrov napr. tlak a teplotu v geotermálnych vrtoch, ultrazvuk, vlhkosť, snímanie hladiny kvapalín a monitorovanie stavu konštrukcie mostov [14].



Obr. 3.8: Vonkajší optický vláknový senzor [14]

Z hľadiska princípu fungovania možno optické vláknové senzory klasifikovať ako modulované podľa intenzity, modulované podľa vlnovej dĺžky, modulované podľa fázy, založené na rozptyle alebo na základe polarizácie [14]:

- **Senzory s modulovanou intenzitou** patrili medzi prvé vyvinuté optické vláknové senzory. Tieto senzory dokážu zistiť fyzikálne zmeny alebo poruchy v prijímanom svetle (strata ohybom, útlm, evanescenčné polia). Jednoduchosť

a nižšie náklady predstavujú výhody tohto typu optických senzorov avšak tieto senzory sú náchylné na kolísanie straty optického výkonu, čo vedie k falošným údajom a preto si vyžadujú referenčný systém na minimalizáciu tohto problému.

- **Senzory s modulovanou vlnovou dĺžkou** merajú zmenu vlnovej dĺžky vo vlákne. Príkladmi snímačov s modulovanou vlnovou dĺžkou sú snímače čierneho telesa, fluorescenčné snímače a snímače s modulovanou vlnovou dĺžkou Braggovej mriežky. Snímač FBG predstavuje najpopulárnejší typ snímača modulovaného vlnovou dĺžkou a často sa používa v rôznych aplikáciách, pretože je schopný jednobodového alebo viacbodového snímania.
- **Fázovo modulované senzory** využívajú princíp interferometrie na meranie interferencie svetla optického vlákna. Tieto snímače sú obľúbené vďaka svojej vysokej citlivosti a presnosti, čo sa však prejavuje aj vo vyššej cene. Najobľúbenejšie fázovo modulované snímače patria Mach-Zehnderov, Sagnacov, Michelsonov a Fabry–Perotov interferometer.
- **Senzory založené na rozptyle** používajú reflektometer OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) na detekciu zmien v rozptýlenom svetle. Tieto senzory sú veľmi obľúbené, pretože umožňujú distribuované snímanie pozdĺž dĺžky vlákna.
- **Senzory založené na polarizácii** detekujú zmeny svetla spôsobené zmenou stavu polarizácie. Tieto senzory využívajú jav dvojlomu v optickom vlákne, kde sa v závislosti od polarizácie mení index lomu. Pri namáhaní optického vlákna dochádza k dvojlomu a výsledkom je detekovateľný fázový rozdiel.

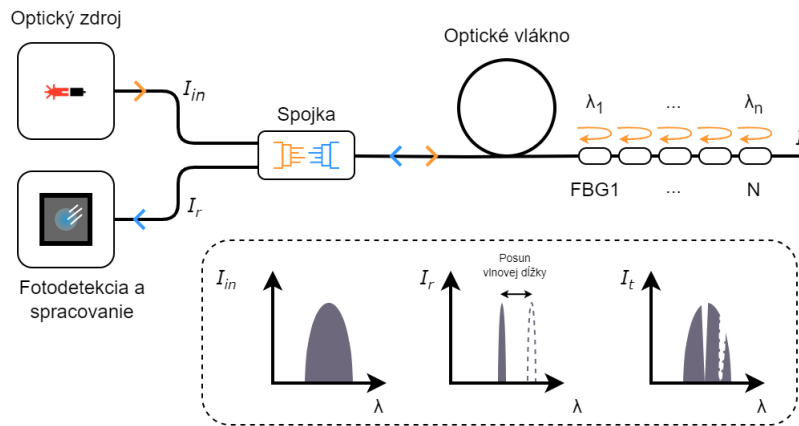
Najpopulárnejšie senzory s optickými vláknami sú rozdelené do troch hlavných skupín, Bragovské optické vláknové senzory, interferometrické a distribuované vláknové senzory.

3.4.1 Bragovské optické vláknové senzory

sú jednoduché, univerzálne a majú malé vlastné snímacie prvky, ktoré majú všetky výhody všeobecne pripisované optickým vláknovým sensorom. Meraná informácia je zakódovaná vo vlnovej dĺžke štruktúry ktorá je absolútnym parametrom. Bragovské senzory sa dajú ľahko multiplexovať do viacbodových snímacích sietí [14].

Tieto senzory fungujú tak, že časť jadra optického vlákna je vystavená periodickému vzorcu UV svetla, čo vedie k trvalej zmene indexu lomu jadra. Odrazená vlnová dĺžka vykazuje vysokú citlivosť na zmeny predĺženia a teploty, ako je znázornené na obr. 3.9. Tieto snímače dokážu eliminovať problémy s amplitúdovými alebo intenzitnými odchýlkami, pretože sú integrované do jadra vlákna a sú kódované podľa vlnovej dĺžky. Výrobný proces týchto senzorov sa v posledných desaťročiach

neustále zdokonaľoval, aby umožnil funkčnú prevádzku v náročných podmienkach s veľmi vysokými teplotami, ako napr. ropný priemysel, plynárenský priemysel a letecké motory [14].



Obr. 3.9: Braggové optické vláknové senzory [14]

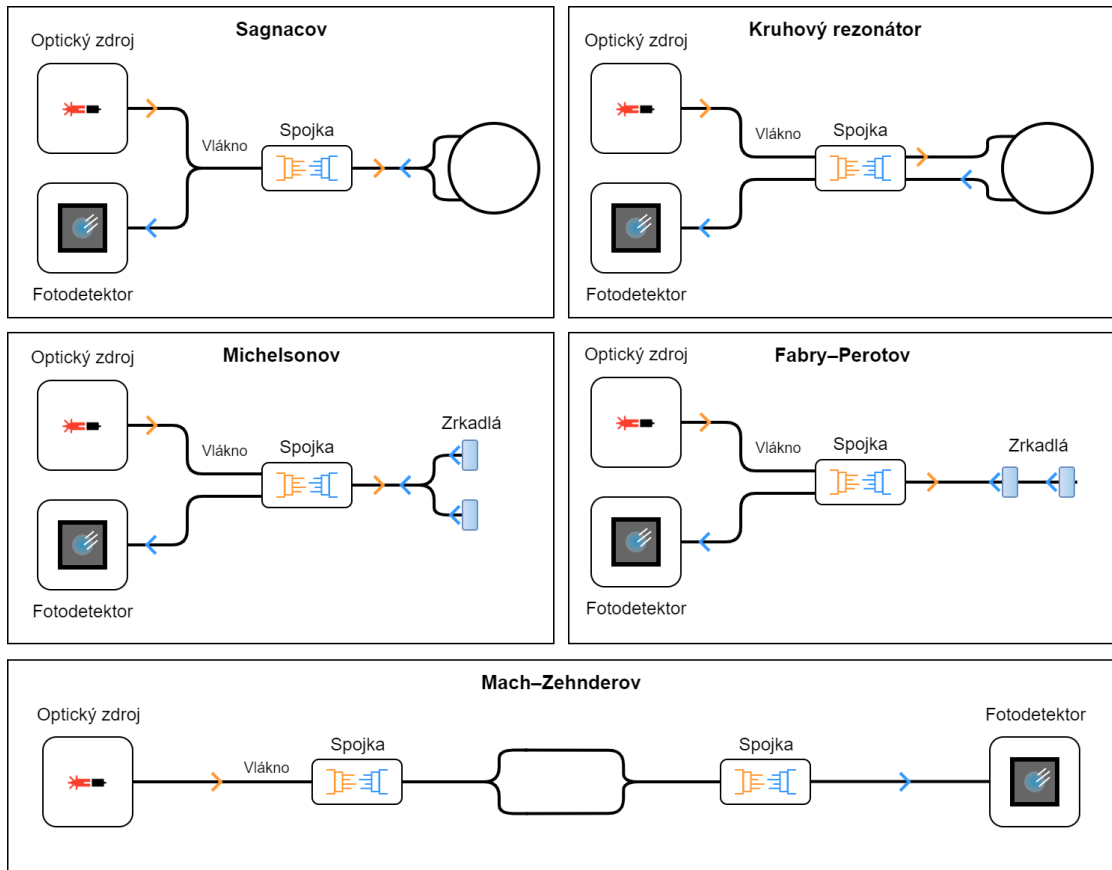
Braggova vlnová dĺžka λ_B v týchto senzoroch alebo vlnová dĺžka odrazeného svetla je daná vzťahom:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (3.1)$$

kde n_{eff} je efektívny index lomu jadra vlákna a Λ je perióda mriežky. Braggova vlnová dĺžka sa mení so zmenami periódy mriežky a efektívneho indexu lomu. Na meranie každého fyzikálneho parametra je potrebné od seba oddeliť účinky teploty a deformácie. Použitie referenčnej mriežky predstavuje praktický a jednoduchý prístup na oddelenie účinkov spôsobených teplotou a deformáciou. Braggové senzory vyžadujú demodulátory ktoré sa používajú na extrakciu meraných informácií zo svetelných signálov. Keďže informácia je zakódovaná v Braggovej vlnovej dĺžke, očakáva sa, že demodulátory budú čítať posuny v Braggovej vlnovej dĺžke a poskytovať údaje o meranej veličine [14].

3.4.2 Interferometrické senzory

Interferometrické optické vláknové senzory, označované aj ako interferometrické senzory, sú fázovo modulované senzory, ktoré merajú interferenciu svetla optického vlákna. Medzi najpoužívanéjšie typy interferometrov patria: Mach – Zehnderov, Sagnacov, Michelsonov, Fabry – Perotov a kruhový rezonátor [14]. Na obr. 3.10 sú znázornené rôzne druhy optických interferometrov.



Obr. 3.10: Typy optických interferometrov [14]

Mach – Zehnderov interferometer funguje tak, že vysiela svetelný lúč rozdelený na dve časti tak, aby sa signál šíril cez referenčné a snímacie rameno. Potom meria fázový posun medzi dvoma svetelnými lúčmi, ktoré sa rekombinujú na detektore. Fázový posun vzniká v dôsledku zmeny dĺžky snímacieho ramena po mechanickom alebo tepelnom namáhaní. Tento typ interferometra sa väčšinou používa na testovanie sietí v telekomunikačnom priemysle, na snímanie teploty a indexu lomu, v zdravotníctve na optoakustické zobrazovacie aplikácie ako snímač srdcovej frekvencie a frekvencie dýchania [14].

Michelsonov interferometer je podobný Mach – Zehnderovmu ale namiesto druhého rozdeľovača lúčov používa zrkadlá na odraz svetla v referenčnom a snímacom ramene späť k zdroju. Používa sa ako snímač indexu lomu a hydrofonický snímač [14].

Fabry – Perotov interferometer je vonkajší senzor, ktorý využíva dve paralelné odrazové plochy oddelené určitou vzdialenosťou a meria interferenciu medzi vysielačným a prijímaným signálom. Široko sa používa na monitorovanie štrukturálnych komponentov a tlaku vo vrtoch v ropnom a plynárenskom priemysle, okrem iného sa využíva aj na snímanie teploty, akustických vln, ultrazvukových vln, hladiny

plynu a kvapaliny [14].

Kruhový rezonátor detekuje zotrvačné otáčanie normálne k rovine kruhového rezonátora a môže sa použiť okrem iného na optické spínanie a fotonické biosenzory [14].

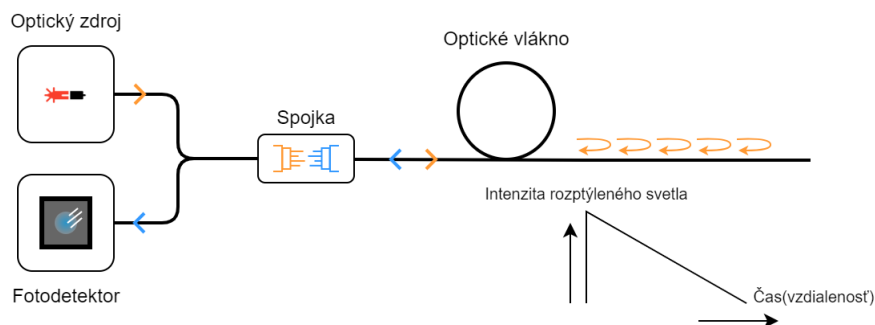
Sagnacov interferometer používa sa na meranie fázového posunu medzi dvomi rôznymi vlnovými dĺžkami šíriacimi sa v opačných smeroch. Zaujímavým typom Sagnacovho interferometra je optický gyroskop, ktorý bol pôvodne predstavený v roku 1976. Zisťuje fázový posun v optickom vlákne, pričom sa predpokladá rotujúca cievka optického vlákna s dvomi svetelnými vlnami pohybujúcimi sa v cievke v opačných smeroch. Tieto svetelné vlny prejdú rôzne vzdialenosti, čo má za následok rôzne časy a rôzne fázy medzi týmito dvomi vlnami. Fázový rozdiel $\Delta\phi$ je daný vzťahom [14]:

$$\Delta\phi = \frac{8\pi N}{\lambda c} A \times \Omega \quad (3.2)$$

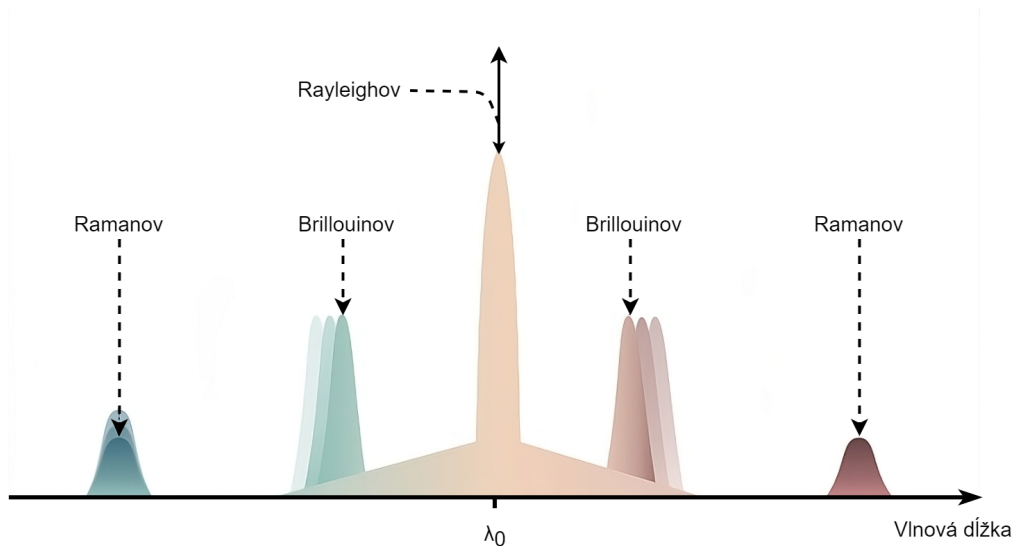
kde N je počet závitov cievky, λ je vlnová dĺžka vo vákuu, c je rýchlosť svetla, A je vektor plochy cievky vlákna a Ω je vektor rýchlosti rotácie (uhlovej frekvencie) [14].

3.4.3 Distribuované senzory

Optical Time Domain Reflectometers (OTDR) sú niektoré považované za najlepšie vyvinuté in – line senzory založené na rozptýlenom svetle šíriacom sa cez vlákno, ktoré obsahuje Rayleighov, Brillouinov a Ramanov rozptyl ako je znázornené na obr. 3.11 a 3.12. Okrem pôvodnej vlnovej dĺžky (nazývanej Rayleighova zložka) obsahuje rozptýlené svetlo zložky s vlnovými dĺžkami, ktoré sú vyššie a nižšie ako pôvodný signál (známe ako Ramanove a Brillouinove zložky). Tieto posunuté zložky obsahujú informácie o vlastnostiach vlákna, ako je napätie a teplota [14].



Obr. 3.11: Optické snímanie založené na spätnom rozptyle svetla [14]



Obr. 3.12: Spektrá rozptýleného svetla v optickom vlákne [14]

Rayleighov rozptyl vyplýva z interakcie svetla s kolísaním indexu lomu v jadre vlákna, ktoré sa javí v priestorových mierkach oveľa kratšie ako je vlnová dĺžka svetla. Rayleighov rozptyl má rovnakú svetelnú frekvenciu ako dopadajúce svetlo a je veľmi slabý, najmä v jednojádrových vláknoch a preto sa v aplikáciách snímania často nepoužíva [14].

Brillouinov rozptyl vzniká interakciou svetla s akustickými módmami v médiu, ktoré sú vyvolané šírením svetla. Určenie Brillouinového frekvenčného posunu vo vzťahu k dopadajúcemu svetlu poskytuje mieru teploty alebo napätia a umožňuje distribuované snímanie vo vláknoch s dlhým dosahom. Tento frekvenčný posun je prirodzenou vlastnosťou každého kremičitého vlákna, a preto umožňuje výrobu lacných snímacích prvkov. Brillouinov rozptyl sa používa pri distribuovanom snímaní veľkých štruktúr, najmä pri snímaní napätia v ropných vrtoch, potrubiach, mostoch alebo elektrických vedeniach [14].

Ramanov rozptyl je výsledkom interakcie šíriaceho sa svetla s molekulárnymi vibráciami v médiu. Charakteristiky rozptylu závisia iba od teploty, čo môže predstavovať výhodu keď je teplota sledovaným parametrom snímania, nakoľko neexistujú žiadne účinky krížovej citlivosti. Ramanov rozptyl v optických vláknoch má oveľa vyšší prah výkonu ako Brillouinov rozptyl. Distribuované snímače teploty s Ramanovým rozptylom majú teplotné rozlíšenie ($0,5^{\circ}\text{C}$) s dosahom merania až 15 km pri rozlíšení 1 m [14].

4 Vlákna zachovávajúce polarizáciu

4.1 Vlákna s dvojlomom

Tieto vlákna boli vytvorené na meranie pre rôzne aplikácie s cieľom nevyhnutne zabezpečiť zachovanie polarizačného stavu šíriacej sa vlny. Vo všeobecnosti sa jedná o anizotropné vlákna, ktoré vykazujú dva rôzne indexy lomu v závislosti od orientácie elektrického poľa svetla, ktoré do nich vstupuje. Dve ortogonálne hlavné osi týchto vlákien zachovávajúcich polarizáciu sa označujú ako rýchla a pomalá os, čo sa vzťahuje na fázovú rýchlosť svetla ktoré sa v nich pohybuje. Lúč vedený v osi s vyšším indexom (pomalá os) bude mať nižšiu rýchlosť ako lúč vedený v kolmej osi (rýchla os). V špeciálnom prípade vypusteného svetla s elektrickým poľom zarovnaným s hlavnou osou materiálu je svetlo vedené v nenarušenom stave polarizácie. Dvojlom vlákna je daný rozdielom indexu lomu dvoch optických osí ako [15]:

$$B = n_s - n_f \quad (4.1)$$

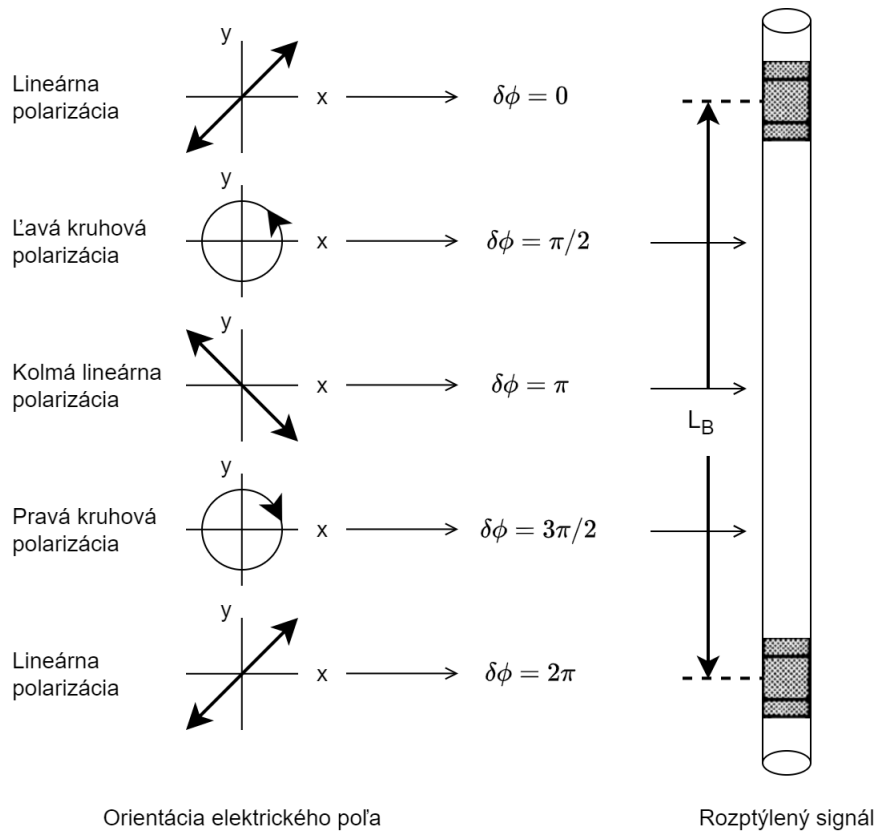
Kde n_s a n_f sú indexy lomu pomalej a rýchlejšej osi v uvedenom poradí. Dvojlom je zvyčajne definovaný v termínoch impulzu dĺžky vlákna L_B . Rozdiel fázového posunu medzi ortogonálnymi polarizáciami je 2π [15]:

$$L_B = \frac{\lambda}{B} \quad (4.2)$$

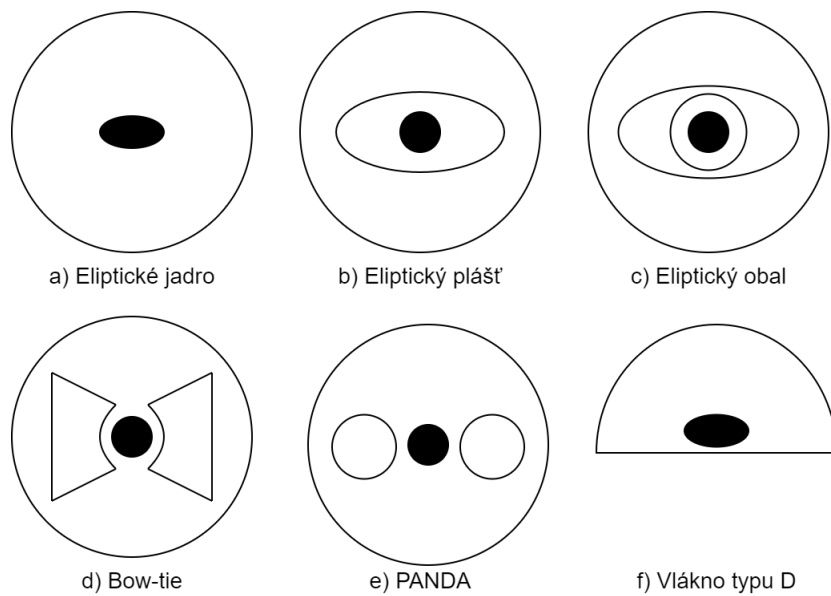
Ak je vlákno mechanicky narušené s periódou porovnateľnou s L_B tak nastane silná výkonová väzba medzi dvomi ortogonálnymi polarizáciami. Preto by hodnota L_B mala byť menšia ako rušivý vplyv [15].

4.2 Vlákna s vysokým dvojlomom

Existujú dva základné spôsoby zavedenia dvojlomu do optických vlákien. Prvá z nich spočíva v modifikácii vlnovodných charakteristík v oblasti jadra pomocou zmeny jeho geometrie tak, že sa stratí kruhová symetria a vzniknú dve osi s rôznymi indexmi lomu. Na obr. 4.1 je zobrazené vizuálne určenie dĺžky L_B , s $\delta\phi$ optickým fázovým rozdielom medzi dvoma ortogonálnymi polarizačnými stavmi. Z hľadiska alternatívneho návrhu možno do vlákna zaviesť lineárny dvojlom aplikovaním asymetrického napätia na jadro, ktoré modifikuje profil indexu lomu jadra. Dosiahne sa to buď tým, že okolie jadra nie je kruhové, alebo tým že sa okolo jadra vytvorí vysoko dopované oblasti. Dvojlom sa indukuje elasto-opticky v dôsledku rôznych koeficientov tepelnej rozťažnosti materiálu obklopujúceho jadro v kombinácii s asymetrickým prierezom vlákna [15]. Existujú rôzne vlákna s vysokým dvojlomom, tieto vlákna sú znázornené na obr. 4.2.



Obr. 4.1: Optické fázové rozdiely medzi ortogonálnymi polarizačnými stavmi [15]



Obr. 4.2: Príklady vlákien s vysokým dvojlomom [15]

4.2.1 Meranie teploty pomocou vlákien s vysokým dvojlomom

Ako znázorňuje obr. 4.3 dva skrížené polarizátory orientované na $\pm 45^\circ$ vzhľadom na optickú os fotoelastického modulátora (PEM). PM vlákno je umiestnené medzi PEM s jeho optickými osami (rýchla a pomalá os) a je zarovnané s optickými osami PEM, ktoré sú v smeroch x a y. Normalizované elektrické pole za prvým polarizátorom je [16]:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}}(i + j). \quad (4.3)$$

Dvojlomové fázové oneskorenie medzi x a y po dĺžke vlákna L je dané vzťahom [16]:

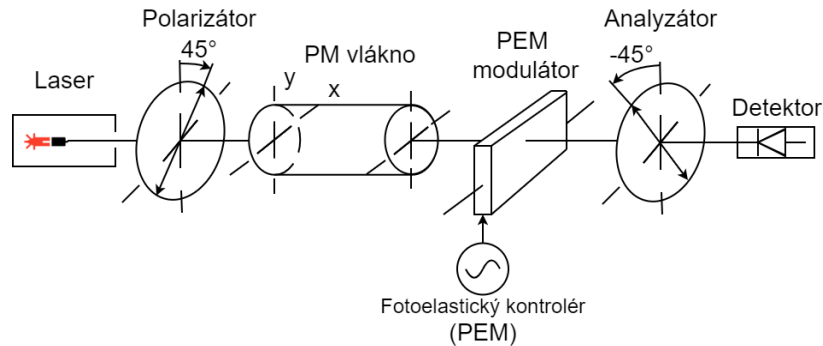
$$\delta\phi = \delta\beta L. \quad (4.4)$$

kde $\delta\beta$ je dvojlom PM vlákna a fázový posun spôsobený PEM je [16]:

$$s = s_0 \cos(\omega t), \quad (4.5)$$

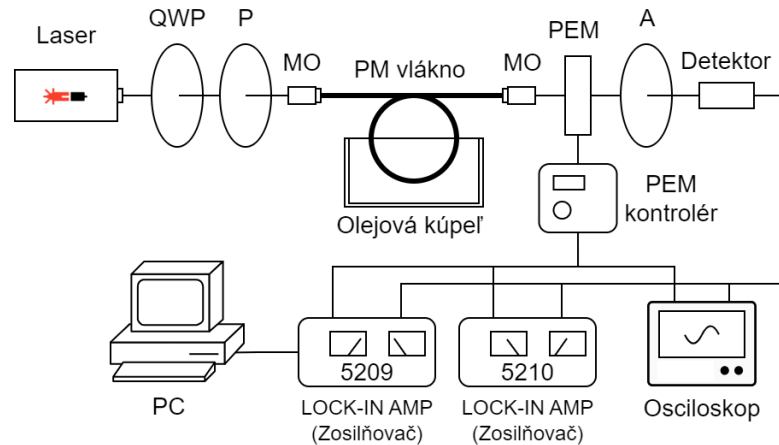
kde $s_0 = \pi/2$ a $f = 50$ kHz. Preto je elektrické pole po fázovej modulácii, modifikované fázovým posunom vlákna a PEM je [16]:

$$E' = 1/\sqrt{2}\{i \exp[(\delta\phi + s)/2] + j \exp[-(\delta\phi + s)/2]\}. \quad (4.6)$$



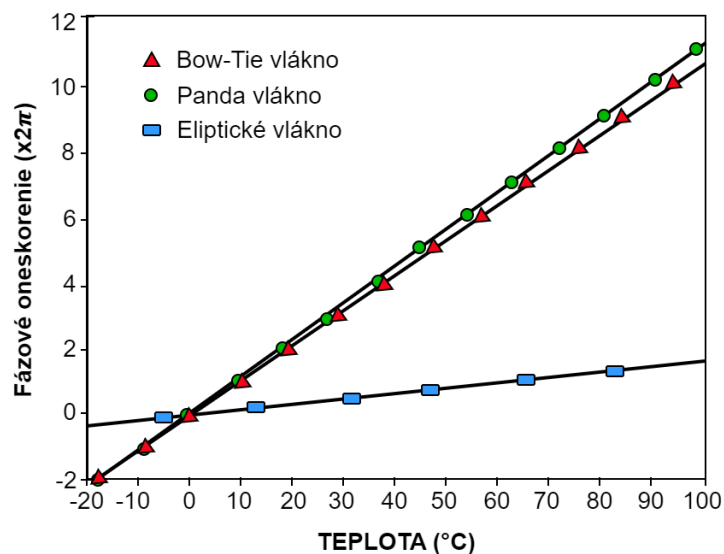
Obr. 4.3: Princíp činnosti optického vláknového senzoru s dynamickou polarimetrickou metódou [16]

Schéma pre merania teploty je zobrazená na obr. 4.4 pričom 10 cm vlákna o celkovej dĺžke 1 m bolo udržiavané bez napätia v parafínovom olejovom kúpeli pomocou mäkkej svorky. Teplotné zmeny sa dosiahli pomocou vyhrievacej platne a suchého ľadu. Aby sa eliminoval vplyv prievanu vzduchu a zmena teploty v miestnosti. Celé vlákno bolo rozdelené na dve rovnaké dĺžky a ich spojením spolu s otočením o 90° . Rozdielne teplotné poruchy boli zabránené izolovaním časti vlákna bavlnou a polystyrénom [16].



Obr. 4.4: Schématické zapojenie pre meranie teplotnej citlivosti PM vlákien [16]

Najprv bol parafrínový olej zahriaty na 100°C , merania boli uskutočnené počas ochladzovania oleja na izbovú teplotu, aby boli získané stabilné výsledky. Pomocou suchého ľadu pokračovalo ochladzovanie oleja na -10°C . Signál ktorý bol pozorovaný detektorom sa periodicky mení medzi prvou a druhou harmonickou zložkou, pretože teplota sa naďalej zvyšuje (alebo znižuje) [16]. Tieto fázové posuvy v závislosti od teploty pre tri vlákna sú zobrazené na obr. 4.5

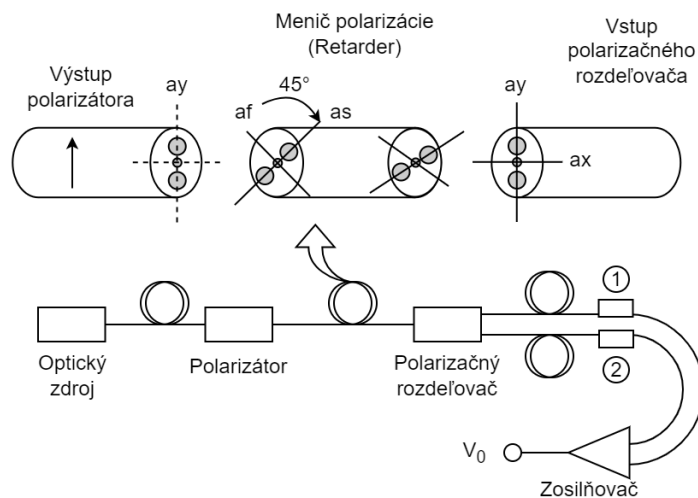


Obr. 4.5: Graf fázového posuvu v závislosti od teploty [16]

Z tohto grafu bolo zistené že teplotná citlivosť eliptického vlákna bola menšia ako u vlákien BOW – TIE a PANDA. Vlákna BOW – TIE a PANDA sú z hľadiska výsledkov porovnateľné. Dvojlom spôsobený tvarovou deformáciou jadra vlákna má väčšiu teplotnú stabilitu ako ten, ktorý je vyvolaný zabudovaným napätím [16].

4.2.2 Meranie teploty na vlákne pomocou polarizačného interferometru

Schéma merania teploty pomocou polarizačného interferometra je na obr. 4.6. Pozostáva z lineárneho polarizátora, polarizačného deliča, meniča polarizácie, dvoch fotodiód a zosilňovača. Menič polarizácie je vložený medzi lineárny polarizátor a polarizačný delič. Rýchla a pomalá os optického deliča je orientovaná s uhlom 45° k lineárnej polarizačnej osi. Polarizačný delič je zarovnaný s lineárnym polarizátorom, ktorý má smer x hlavnej osi [17].

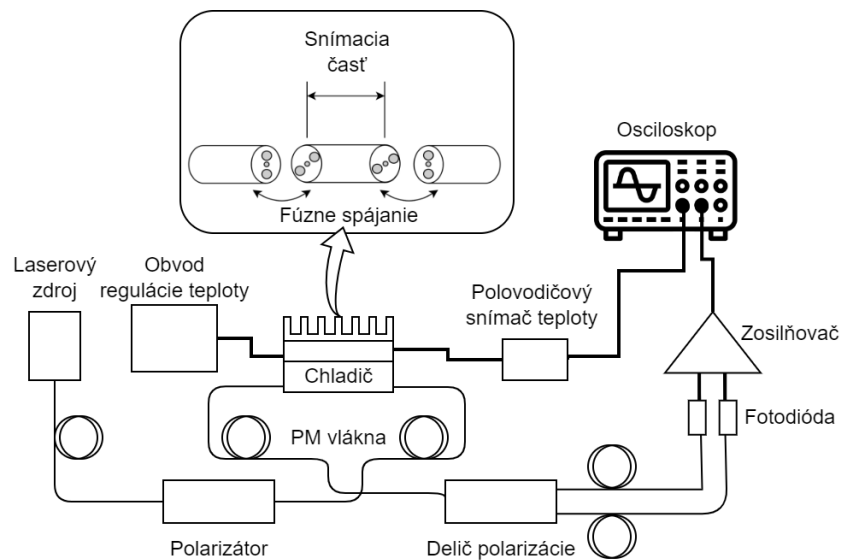


Obr. 4.6: Schéma optického vláknového snímača teploty pracujúceho na princípe polarizačného interferometru [17]

Dopadajúci optický lúč, ktorý je lineárnym polarizátorom polarizovaný do osi x, sa spustí do meniča polarizácie. Pretože je menič polarizácie orientovaný pod uhlom 45° k lineárnej polarizačnej osi, stavy polarizácie rýchlej a pomalej osi optického lúča majú rovnaké amplitúdy a fázy na vstupe meniča polarizácie. Po prechode meničom polarizácie optický lúč zaznamená fázový rozdiel medzi rýchlou a pomalou osou. Optický lúč vychádzajúci z meniča polarizácie sa rozdelí na zložky polarizácie x a y pomocou deliča polarizácie. Ak by bola vlnová dĺžka optického lúča konštantná a monochromatická tak fázový rozdiel medzi týmito dvomi osami možno určiť pomocou rozdielu dĺžky a indexu lomu optického meniča. Optické lúče vystupujúce z polarizačného deliča sú vstupmi do dvoch fotodiód. Fotoprúdy produkované fotodetektormi sú vstupmi do logaritmického zosilňovača [17].

Na obr. 4.7 je zobrazené experimentálne zapojenie optického vláknového snímača citlivého na teplotu. Zapojenie pozostáva z diódového laserového zdroja, lineárneho

polarizátora, vlákien zachovávajúce polarizáciu, dvoch fotodiód a logaritmického zosilňovača. Menič polarizácie časti na snímanie teploty bol orientovaný na lineárny polarizátor pod uhlom 45° . Termoelektrický chladič reguluje teplotu komory s konštantnou teplotou. Polovodičový snímač teploty meria teplotu meniča polarizácie v komore. Výstupné napätie logaritmického zosilňovača a polovodičového snímača teploty sa meria digitálnym osciloskopom. Boli použité vlákna typu PANDA a úseky vlákien bolo spojené pomocou zvarovania. Merané boli dve dĺžky teplotného snímača, prvým typom bolo senzorické vlákno o dĺžke 10 cm a druhé senzorické vlákno bolo o dĺžke 11,5 cm. Teplotné rozpätie bolo od $-8,5^\circ$ do $86,0^\circ$ [17].



Obr. 4.7: Experimentálne zapojenie optického vláknového snímača citlivého na teplotu [17]

5 Praktická časť

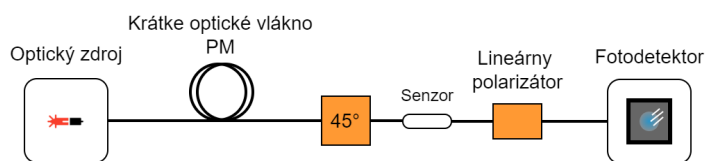
V teoretickej časti tejto diplomovej práce boli overené základy teórie svetla, základy polarizácie, zoznámenie sa s optovláknovými komponentami a v neposlednom rade s vláknami ktoré zachovávajú polarizáciu. V praktickej časti sú najskôr zobrazené tri navrhnuté schémy zapojenia, ktoré sú medzi sebou porovnané. Z týchto troch navrhnutých schém zapojenia je vybrané jedno zapojenie, ktoré je najlepšie z hľadiska funkčnosti a náročnosti. Ďalej sú podrobne popísané zariadenia ktoré sa využívajú práve v tejto schéme zapojenia.

5.1 Návrh schémy pre meranie

5.1.1 Porovnanie rôznych navrhnutých schém zápojení

V tejto sekcii sú zobrazené navrhnuté schémy zapojenia, navrhnuté schémy sú celkovo tri a sú podrobnejšie popísané a porovnané nižšie.

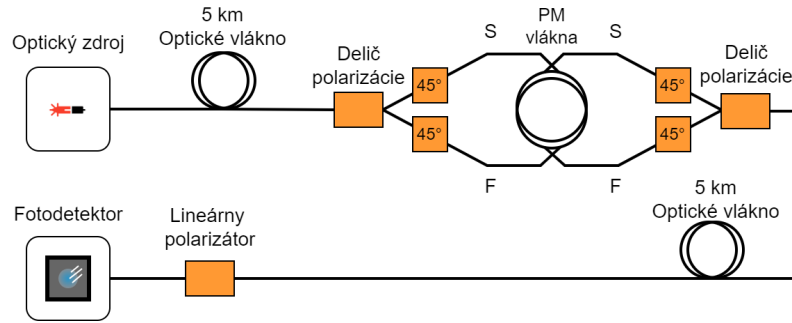
Navrhnutá schéma zapojenia 1 – jednovláknová, na obr. 5.1 je navrhnutá schéma zapojenia, toto zapojenie sa skladá z optického zdroja za ktorým nasleduje krátke optické vlákno zachovávajúce polarizáciu, vlákno je pootočené o 45° , princíp pootočenia vlákna je zobrazený na obr. 5.4. Nasleduje senzor a za senzorom je lineárny polarizátor ktorý prepúšťa lineárne polarizované svetlo a zároveň blokuje ortogonálnu polarizáciu ktorá pochádza z optického zdroja svetla. Na konci tejto trasy je umiestnený fotodetektor. Nevieme kde je polarizačný stav, nemožno vzbudiť obidve osi (rýchlu a pomalú) s rovnakým výkonom, čo znamená že nastane náhodná polarizácia v náhodnom čase. Toto zapojenie je použiteľné v praxi len pre krátke vzdialenosti, z čoho vyplýva že jeho veľkou nevýhodou je nemožnosť použitia na veľké vzdialenosti.



Obr. 5.1: Navrhnutá jednovláknová schéma zapojenia

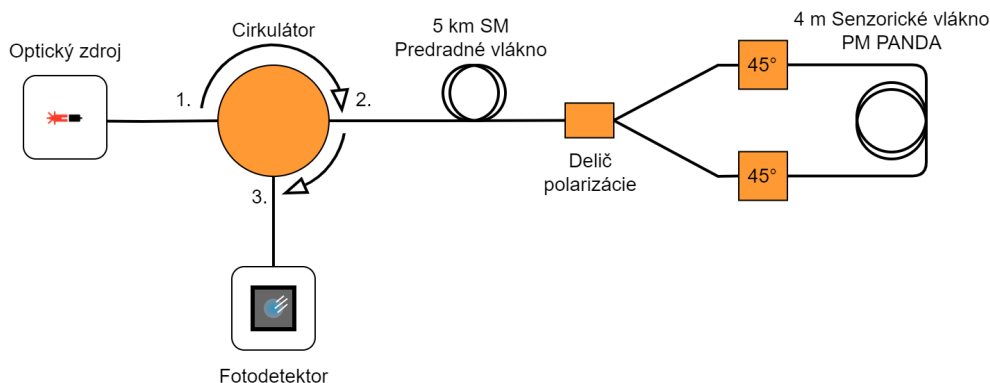
Navrhnutá schéma zapojenia 2 – dvojláknová, na obr. 5.2 je navrhnutá schéma zapojenia, toto zapojenie sa skladá z optického zdroja za ktorým nasleduje optické vlákno, vlákno pokračuje do polarizačného deliča, princíp polarizačného deliča je popísaný nižšie. Polarizačný delič oddelí rýchlu osu od pomalej a nasleduje pootočenie optických vlákien o 45° . Nevieme ktorá osa je ktorá, no vieme že výkon

bude buď do rýchlej alebo pomalej osi, vieme že obidve tieto roviny budú vybudené v senzore s rovnakým výkonom. Trasa pokračuje cez 5 km optické vlákno po lineárny polarizátor za ktorým nasleduje fotodetektor. Z hľadiska funkčnosti je toto zapojenie funkčné, avšak existuje jednoduchšie riešenie, nakoľko toto zapojenie vyžaduje dve sensorické vlákna a dva polarizačné deliče.



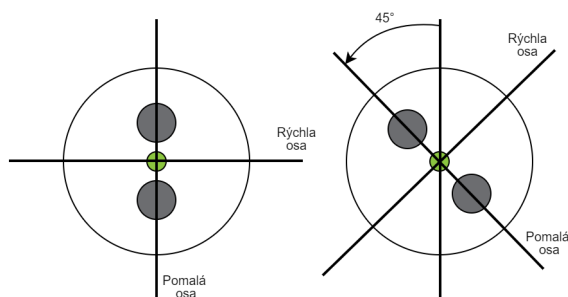
Obr. 5.2: Navrhnutá dvojlávková schéma zapojenia

Navrhnutá schéma zapojenia 3 – s cirkulátorom, na obr. 5.3 je navrhnutá schéma zapojenia, toto zapojenie sa skladá z optického zdroja ktorý je na začiatku, za ním nasleduje cirkulátor, princíp cirkulátoru je popísaný nižšie. V cirkulátore ideme z portu 1 na port 2 za ktorým nasleduje 5 km jednoividového predradného vlákna, nasleduje delič polarizácie ktorý oddelí rýchlu os od pomalej, za týmto deličom polarizácie je vlákno pootočené o 45° , vďaka svetlu ktoré ide cez vlákno, možno vzbudiť obidve osi, rýchlu aj pomalú. Zobrazenie pootočeného vlákna o 45° je znázornené na obr. 5.4. Trasa sa vráti po predradnom vlákne na cirkulátor a ďalej pokračuje cez port 3, na konci tejto trasy je umiestnený fotodetektor. Táto navrhnutá trasa je najlepšia, z hľadiska funkčnosti a náročnosti, nakoľko v porovnaní s dvojlávkovou trasou nám ušetrí jedno sensorické vlákno a jeden delič polarizácie. Výhodou je použitie len jedného vlákna, v tomto prípade 5 km vlákna, nakoľko je použitý duplexný režim, čo znamená že dokážeme prenos po jednom vlákne dvomi smermi, jedným tam a druhým späť.



Obr. 5.3: Navrhnutá schéma zapojenia s cirkulátorom

Na obr. 5.4 je znázornené pootočenie vlákna typu PANDA o 45° .

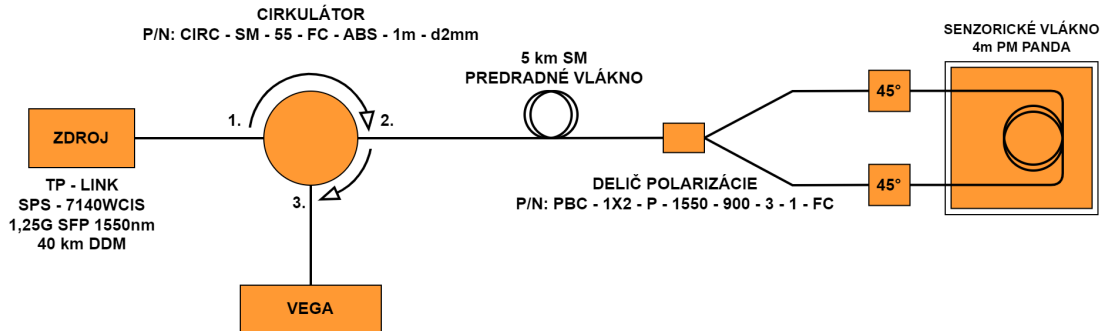


Obr. 5.4: Zobrazenie pootočenia vlákna typu PANDA o 45°

5.1.2 Návrh možného zapojenia a merania

Zapojenie ktoré je vhodné a bolo navrhnuté v tejto diplomovej práci je zobrazené na obr. 5.5. Z hľadiska teplotného pôsobenia treba overiť závislosť fázy (výkonu na výstupe cirkulátora). Stav polarizácie na výstupe senzora by sa nemal zmeniť. Medzi cirkulátorom a senzorom bolo potrebné umiestniť zariadenie na zmenu polarizácie, v tomto prípade delič polarizácie. Pri rôznych zmenách vstupnej polarizácie možno experimentálne určiť čo sa deje so stavmi polarizácie. Ako zdroj svetla bude použitý štandardný modul SFP (small form – factor pluggable). SFP modul je kompaktný, používa sa pre telekomunikačné a dátové komunikačné aplikácie, tento modul je potrebný pre pripojenie optických vlákien. Nakoľko je v tomto zapojení cirkulátor, tak možno zaviesť optickú vlnu do sensorového vlákna, čo znamená že toto zapojenie môže byť použité v rôznych nebezpečných prostrediach. Keďže je použitý duplexný režim tak na prenos fázovo modulovanej optickej vlny zo sensorového vlákna do detektora možno použiť len jedno jediné optické vlákno, čo je veľkou výhodou.

Trasa je navrhnutá na veľké vzdialenosti, rádovo v kilometroch, to že je na veľké vzdialenosti je jej obrovskou výhodou. Pri zapojení v nebezpečných prostrediach je potrebné do týchto prostredí umiestniť len neelektrický senzor a delič polarizácie. Delič polarizácie sa používa na oddelenie rýchlej osi od pomalej a taktiež na budenie oboch koncov senzora v opačných smeroch, čo vyplýva z teoretickej časti tejto diplomovej práce.



Obr. 5.5: Navrhnutá schéma pre meranie

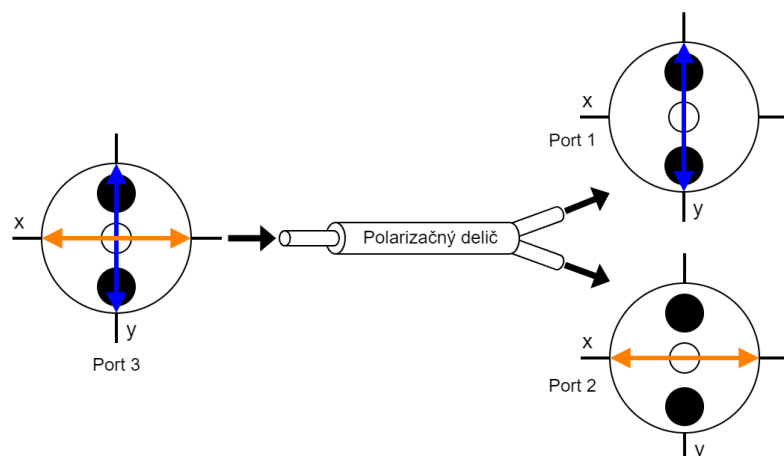
5.1.3 Použité zariadenia v zapojení

V zapojení z obr. 5.5 sú použité tieto zariadenia:

- Zdroj (TP-LINK, SPS-7140WCIS, 1,25G SFP 1550nm, 40 km DDM)
- Polarizačný delič (P/N: PBC-1X2-P-1550-900-3-1-FC)
- Cirkulátor (P/N: CIRC-SM-55-FC-ABS-1m-d2mm)
- Predradné vlákno (o dĺžke 5 km)
- Senzorické vlákno (o dĺžke 4 m PM PANDA)
- VEGA (optický merač výkonu)

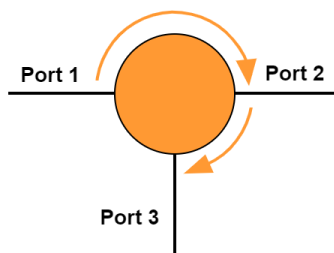
5.2 Popis jednotlivých komponentov v zapojení

Polarizačný delič, na obr. 5.6 je znázornený princíp polarizačného deliča v praxi. Jedná sa o zariadenie ktoré rozdelí vstupný signál na dva signály, jeden signál je v horizontálnej rovine a druhý signál je vo vertikálnej rovine.



Obr. 5.6: Polarizačný delič [10]

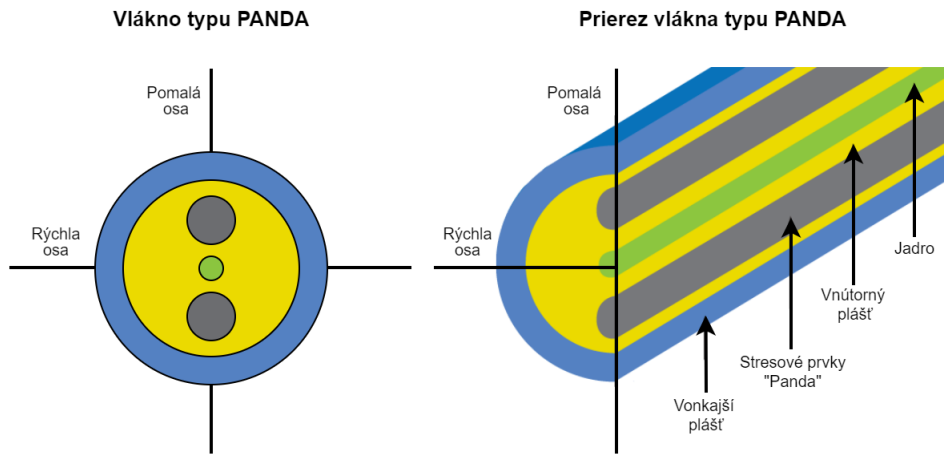
Cirkulátor znázornenie funkcie cirkulátora ktorý je použitý v zapojení je zobrazený na obr. 5.7. V porte 1 vchádza lúč ktorý smeruje na port 2, z druhého portu tento lúč smeruje na port 3.



Obr. 5.7: Cirkulátor [8]

Predradné vlákno jedná sa o optický prepojovací kábel, pozostáva z jedného vlákna, zvyčajne sa dĺžky predradného vlákna pohybujú od 100 m až po 5000 m. Jednou z najdôležitejších vlastností tohto vlákna sú kvalitné konektory, ktoré majú priamy vplyv na výsledky merania [18].

Senzorické vlákno typu PANDA na obr. 5.8 je znázornené senzorické vlákno typu PANDA. Stresové prvky sú valcového typu a sú paralelné s jadrom vlákna, tieto stresové prvky aplikujú napätie, ktoré vytvára dvojlom v jadre vlákna, čo umožňuje ich použitie so zachovaním polarizácie [19].

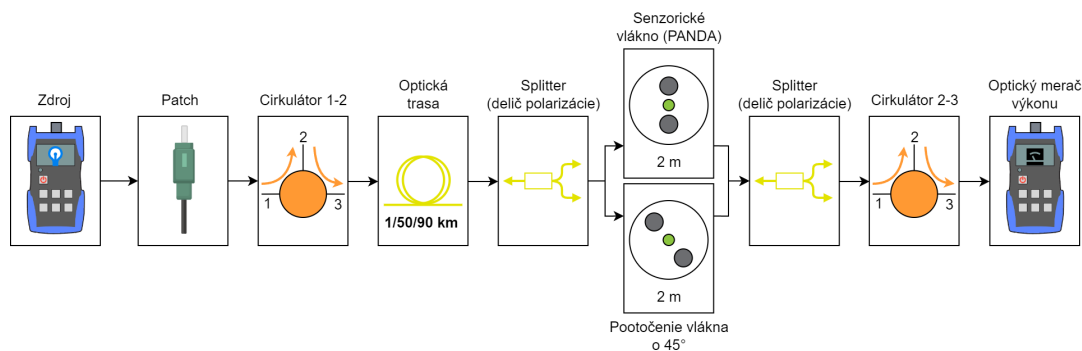


Obr. 5.8: Znáozornenie vlákna typu PANDA [19]

6 Realizácia meraní

6.1 Detekcia senzorického vlákna pri aplikovaní závaží rôznej hmotnosti

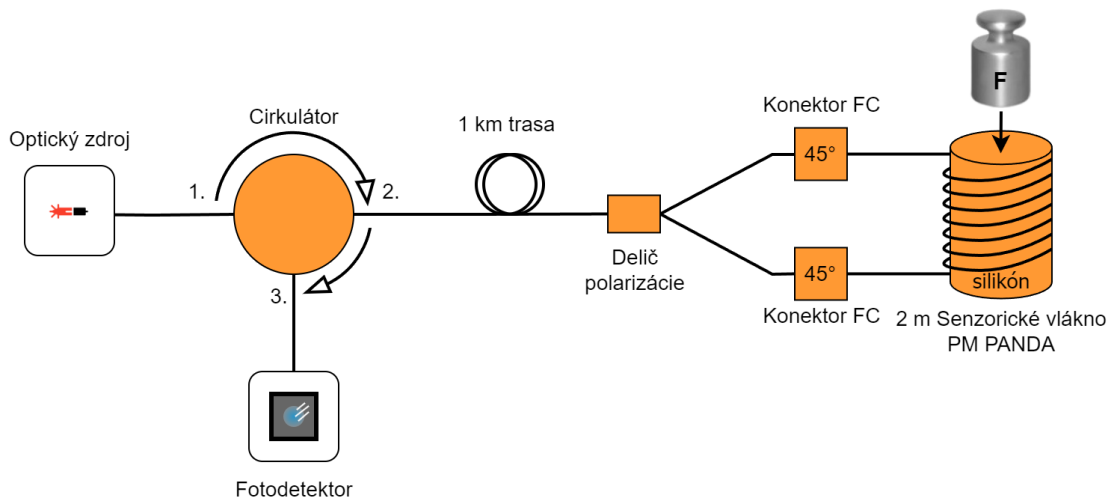
Merania boli vykonané na rôznych trasách s odlišnými dĺžkami, konkrétne 1 km, 50 km, 90 km a taktiež na reálnej trase s dĺžkou 4,5 km. Cieľom bolo preskúmať a porovnať reakciu senzorického vlákna spolu s možnosťou detekcie na aplikované závažia s rôznymi hmotnosťami. Meranie bolo zapojené podľa schémy a následne bolo spustené pomocou PC softvéru StarLab, začiatok merania je v 0 s, celková dĺžka merania je 90 s. Pre lepšie pochopenie zapojenia tohto merania bol vytvorený obr. 6.1 ktorý zobrazuje postupnosť tejto trasy, od začiatku až po koniec. Schéma pre 1 km trasu je na obr. 6.2, pre 50 km trasu na obr. 6.27, pre 90 km trasu na obr. 6.52 a na záver pre reálnu trasu o dĺžke 4,5 km na obr. 6.74.



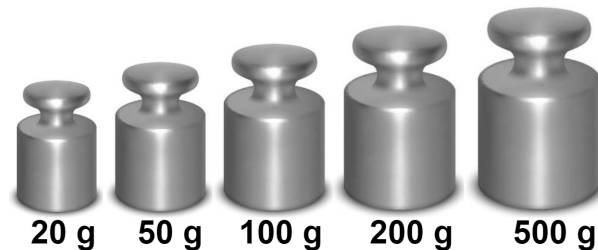
Obr. 6.1: Zobrazenie postupnosti pre 1/50/90 km trasu

6.1.1 Meranie na 1 km trase

V tejto podsekcii sú všetky merania realizované na 1 km optickej trase, schéma tejto trasy je zobrazená na obr. 6.2. Meranie na 1 km trase bolo uskutočnené pre rôzne typy závaží ako možno vidieť na obr. 6.3. Teplota v miestnosti bola 24°C.



Obr. 6.2: Schéma zapojenia pre 1 km trasu

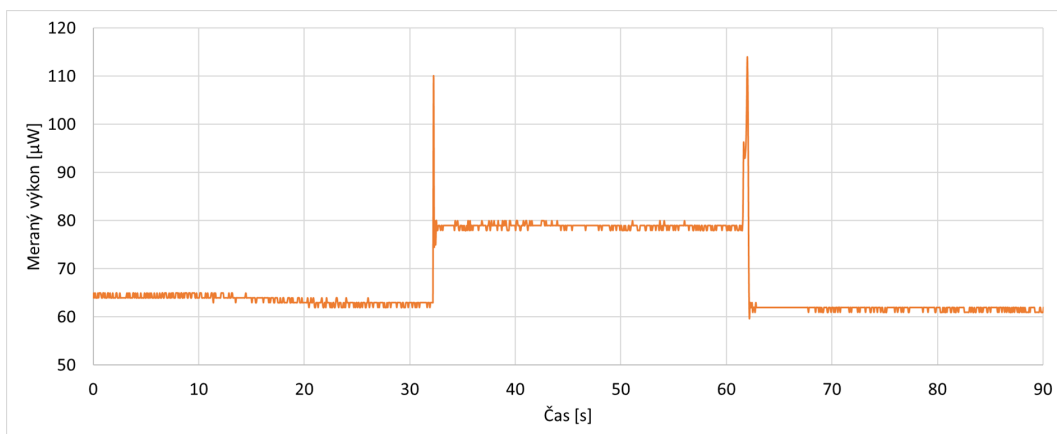


Obr. 6.3: Znázornenie rôznych typov závaží pre 1 km trasu

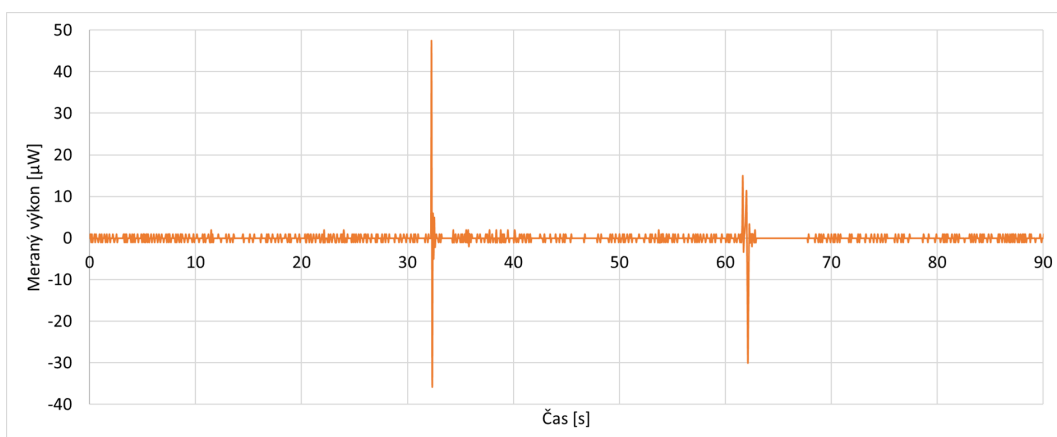
1. meranie – 1 km trasa a 20 g závažie

Meranie 1 km trasy bolo realizované pre 20 g závažie. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polozenia a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenie závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené a spracované grafy.

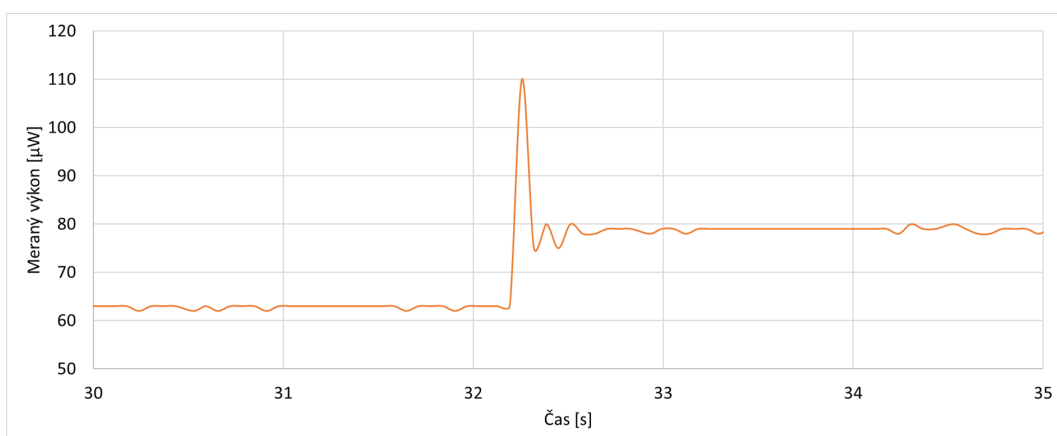
Na obr. 6.4 možno vidieť že ustálená hodnota meraného výkonu bola $64 \mu\text{W}$, v 32 s prišlo k priloženiu závažia a nastal nárast výkonu na $110 \mu\text{W}$, závažie zostalo položené a výkon sa ustálil na $80 \mu\text{W}$. V 62 s bolo odobrané závažie a nastal znovu nárast výkonu na $114 \mu\text{W}$, následne sa výkon ustálil na $64 \mu\text{W}$. Pre lepšiu viditeľnosť detekcie polozenia a odobrania závažia bol vytvorený graf na obr. 6.5, tento graf bol vytvorený pomocou vypočítania rozdielov zmeny vo výkone. Na obr. 6.6 a 6.7 je zobrazené polozenie závažia v 30 s a následne jeho odobranie v 60 s, možno vidieť z grafov náhly nárast výkonu pri položení závažia a následne pri odobraní závažia.



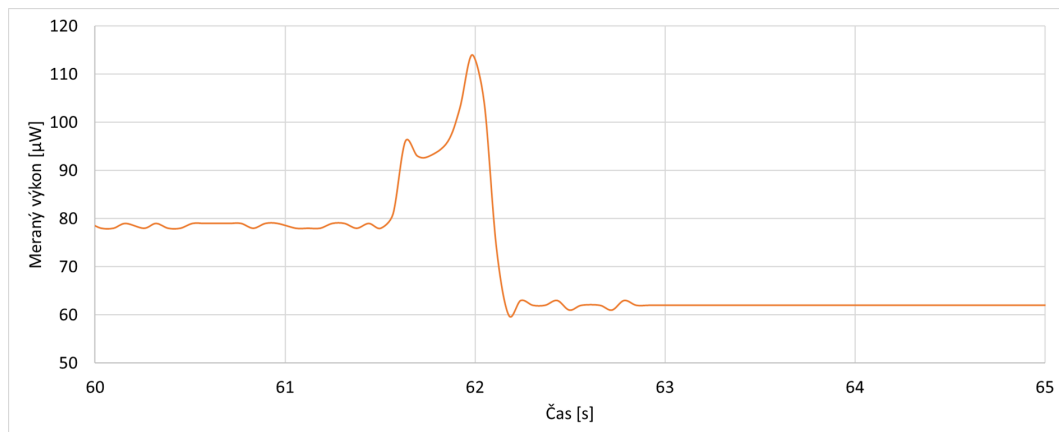
Obr. 6.4: Graf detekcie pri položení a odobratí 20 g závažia (1 km)



Obr. 6.5: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 20 g závažia (1 km)



Obr. 6.6: Graf polozenia 20 g závažia v 30 s (1 km)

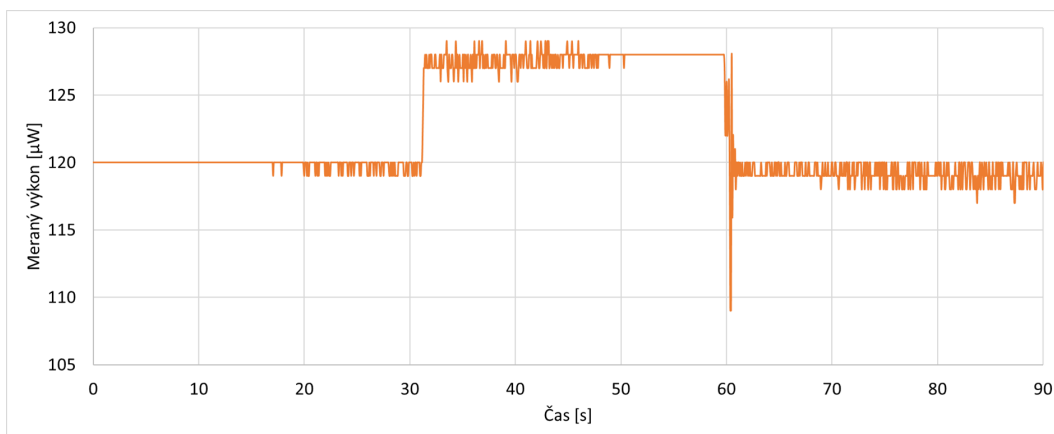


Obr. 6.7: Graf odobrania 20 g závažia v 60 s (1 km)

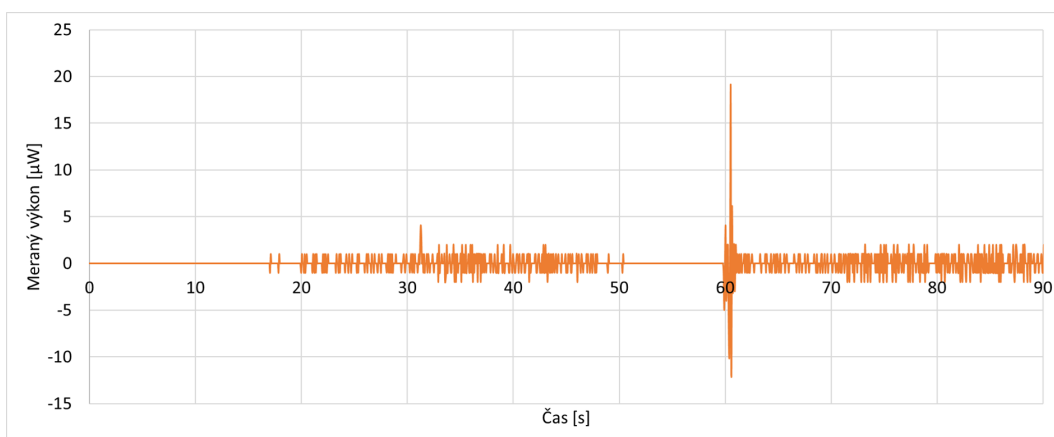
2. meranie – 1 km trasa a 50 g závažie

Druhé meranie na 1 km trase bolo realizované pre 50 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polohy a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polohy závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené a spracované grafy.

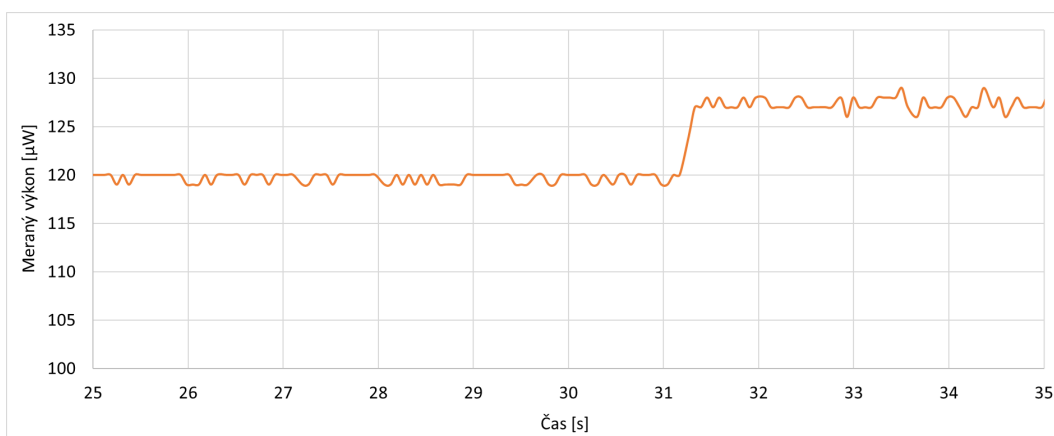
V prvom grafe možno vidieť že ustálená hodnota meraného výkonu bola $120 \mu\text{W}$, v 31 s prišlo k priloženiu závažia a nastal nárast výkonu na $128 \mu\text{W}$, závažie zostalo položené a výkon zostal na hodnote $127 \mu\text{W}$. V 60 s bolo odobrané závažie a nastal pokles výkonu o -10 a následne nárast o $19 \mu\text{W}$, po tomto kolísaní výkonu sa výkon ustálil na hodnote $119 \mu\text{W}$. Pre lepšiu viditeľnosť detekcie polohy a odobrania závažia bol vytvorený druhý graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone, kde môžeme vidieť veľký rozdiel v 60 s pri odobraní závažia kde máme náhly nárast a zároveň aj pokles. V treťom grafe je zobrazené polohy závažia v 31 s, kde môžeme vidieť detailnejšie nárast výkonu zo 120 na $124 \mu\text{W}$. V poslednom grafe je zobrazené odobranie závažia v 61 s, kde môžeme vidieť detailnejšie pokles výkonu zo 127 na $120 \mu\text{W}$.



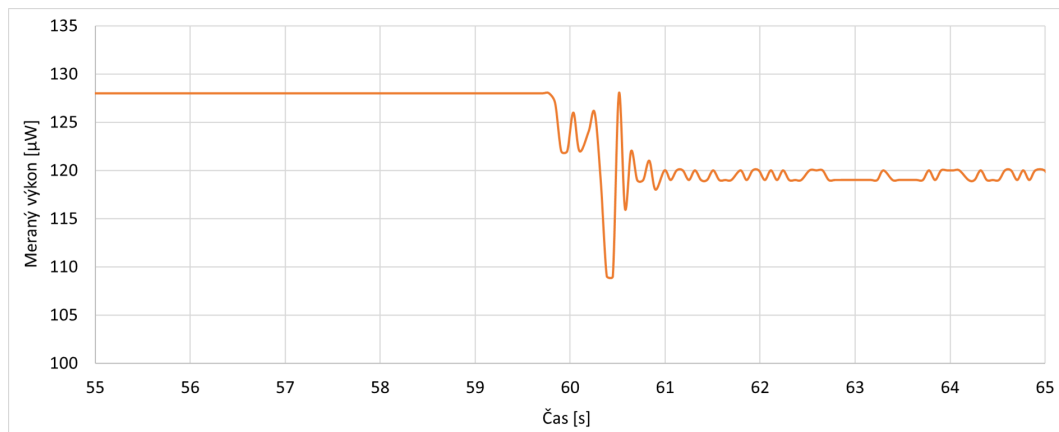
Obr. 6.8: Graf detekcie pri položení a odobratí 50 g závažia (1 km)



Obr. 6.9: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 50 g závažia (1 km)



Obr. 6.10: Graf polozenia 20 g závažia v 30 s (1 km)

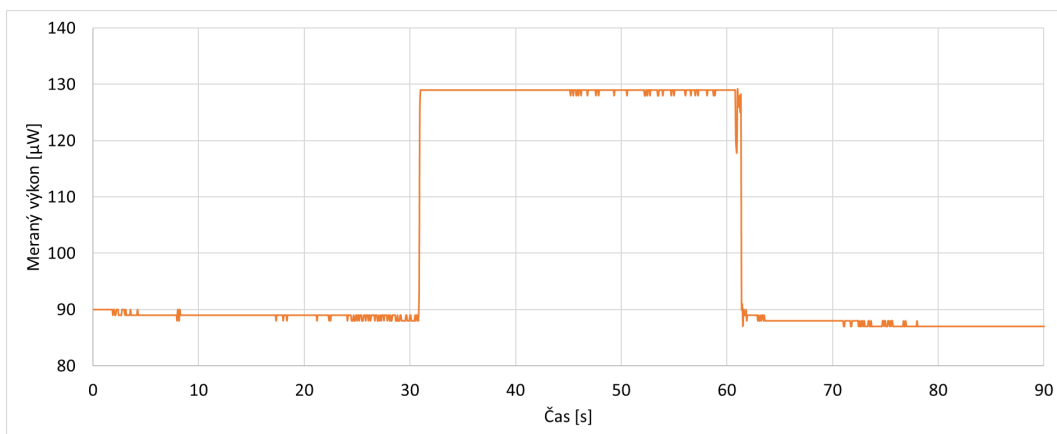


Obr. 6.11: Graf odobrania 50 g závažia v 60 s (1 km)

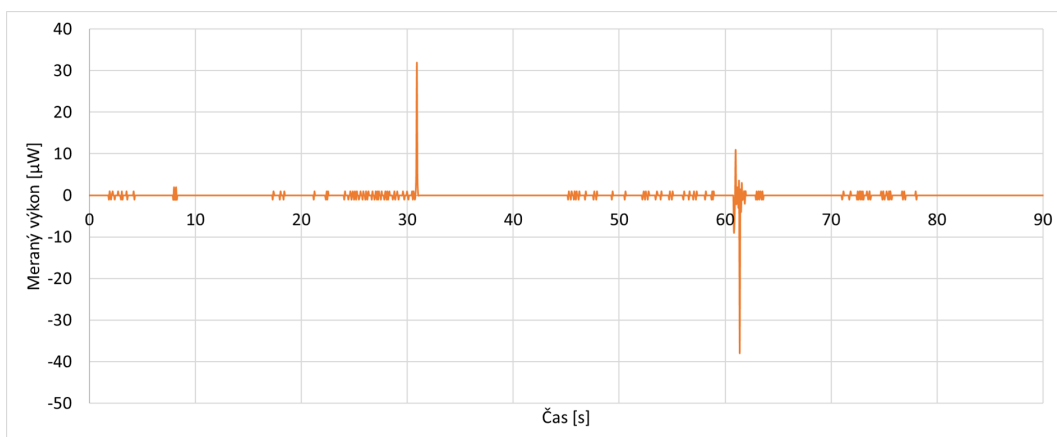
3. meranie – 1 km trasa a 100 g závažie

Tretie meranie na 1 km trase bolo realizované pre 100 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polozenia a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenie závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené a spracované grafy.

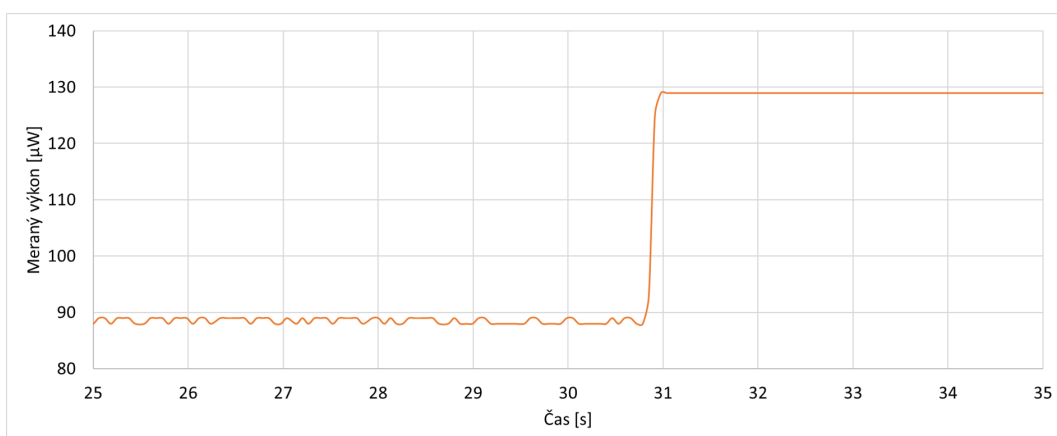
V prvom grafe možno vidieť že ustálená hodnota meraného výkonu bola $90 \mu\text{W}$, v 31 s prišlo k priloženiu závažia a nastal nárast výkonu na $129 \mu\text{W}$, závažie zostalo položené a výkon zostal na hodnote $129 \mu\text{W}$ až do doby kedy bolo v 60 s odobrané závažie a nastal pokles výkonu o -38 , čiže na hodnotu $91 \mu\text{W}$, výkon sa následne ustálil na $89 \mu\text{W}$. Pre lepšiu viditeľnosť detekcie polozenia a odobrania závažia bol vytvorený druhý graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone, kde môžeme vidieť veľký rozdiel v 30 s, kde nastalo zvýšenie výkonu a pri odobraní závažia v 60 s kde nastal pokles výkonu. V treťom grafe je zobrazené polozenie závažia v 31 s, kde môžeme vidieť detailnejšie nárast výkonu z 90 na $129 \mu\text{W}$. V poslednom grafe je zobrazené odobranie závažia v 61 s, kde môžeme vidieť pokles výkonu z 129 na $90 \mu\text{W}$.



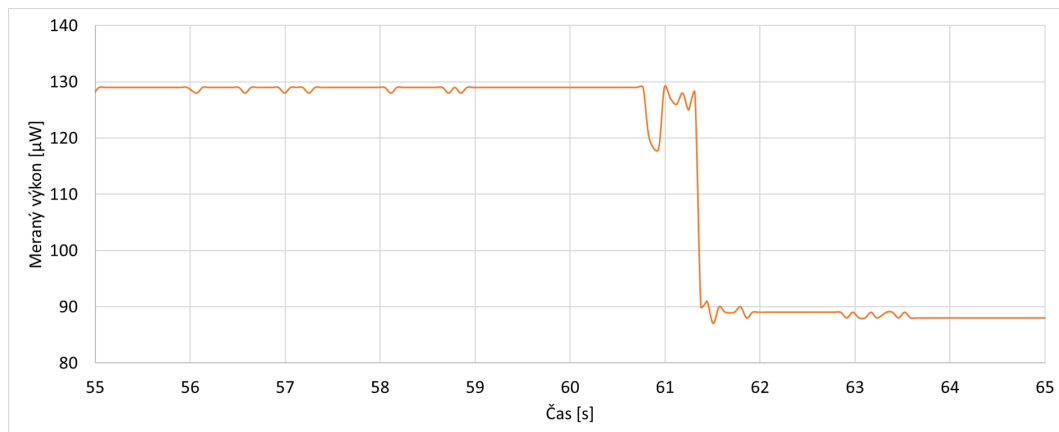
Obr. 6.12: Graf detekcie pri položení a odobratí 100 g závažia (1 km)



Obr. 6.13: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 100 g závažia (1 km)



Obr. 6.14: Graf polozenia 100 g závažia v 30 s (1 km)

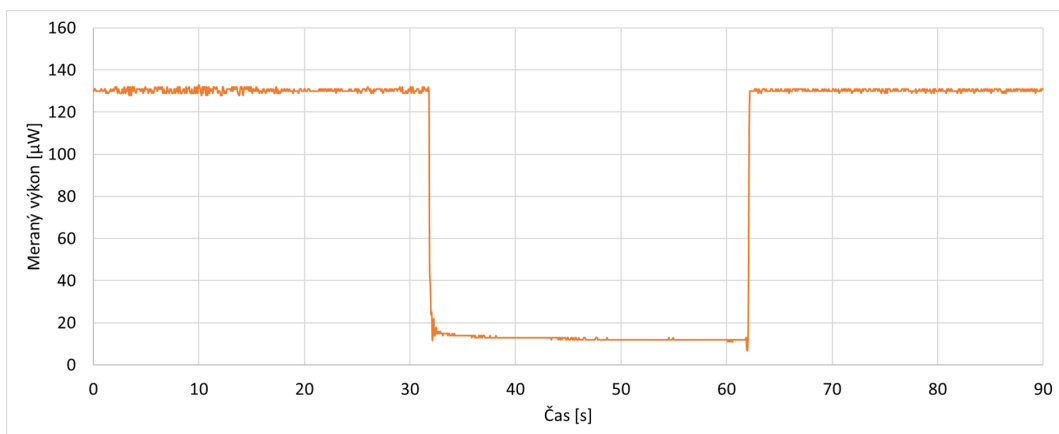


Obr. 6.15: Graf odobrania 100 g závažia v 60 s (1 km)

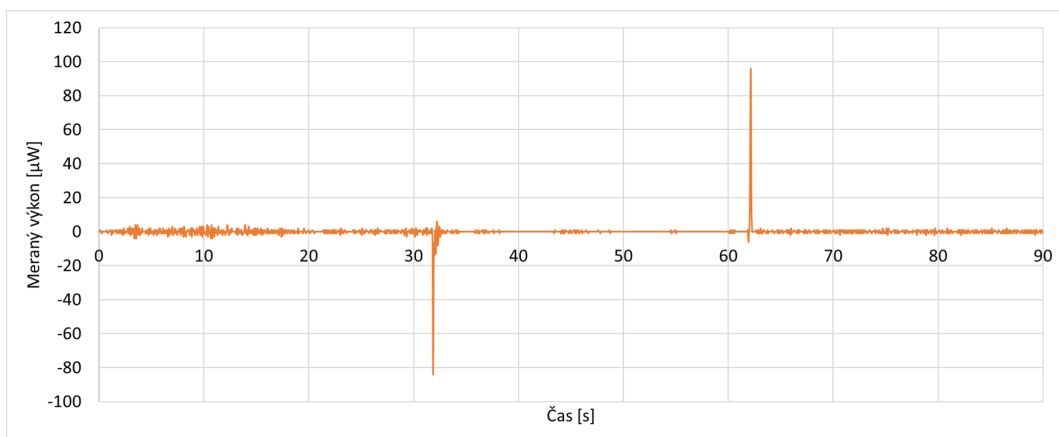
4. meranie – 1 km trasa a 200 g závažia

Štvrté meranie na 1 km trase bolo realizované pre 200 g závažia. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažia bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polozenia a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenia závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené a spracované grafy.

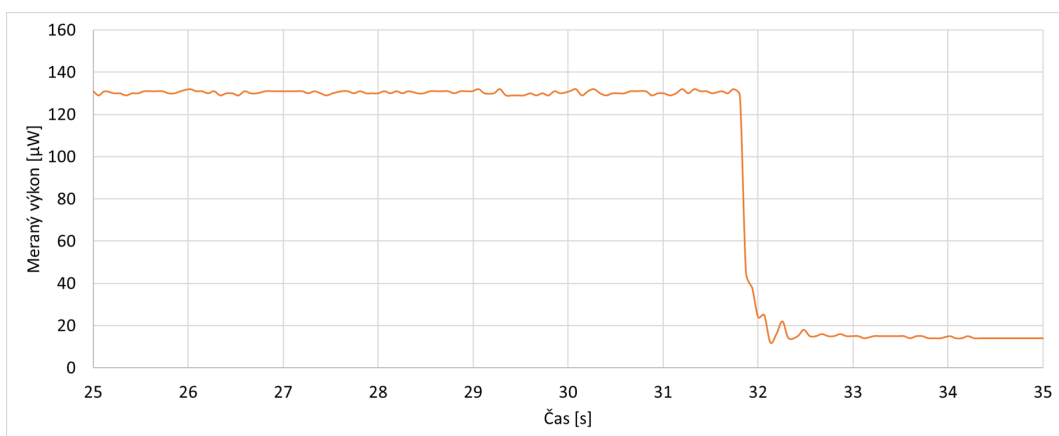
V prvom grafe možno vidieť že ustálená hodnota meraného výkonu bola 130 μW , v 31 s prišlo k priloženiu závažia a nastal pokles výkonu na 16 μW , závažia zostalo položené a výkon zostal na hodnote 15 μW až do doby kedy bolo v 62 s odobrané závažia a nastal nárast výkonu na 130 μW . μW , výkon sa následne ustálil na tejto hodnote. Pre lepšiu viditeľnosť detekcie polozenia a odobrania závažia bol vytvorený druhý graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone, kde možno vidieť veľký rozdiel v 30 s, kde nastalo zníženie výkonu a pri odobraní závažia v 60 s nastal nárast výkonu. V treťom grafe je zobrazené polozenie závažia v 31 s, kde možno vidieť detailnejšie pokles výkonu z 130 na 16 μW . V poslednom grafe je zobrazené odobranie závažia v 62 s, kde možno vidieť nárast výkonu z 16 na 130 μW .



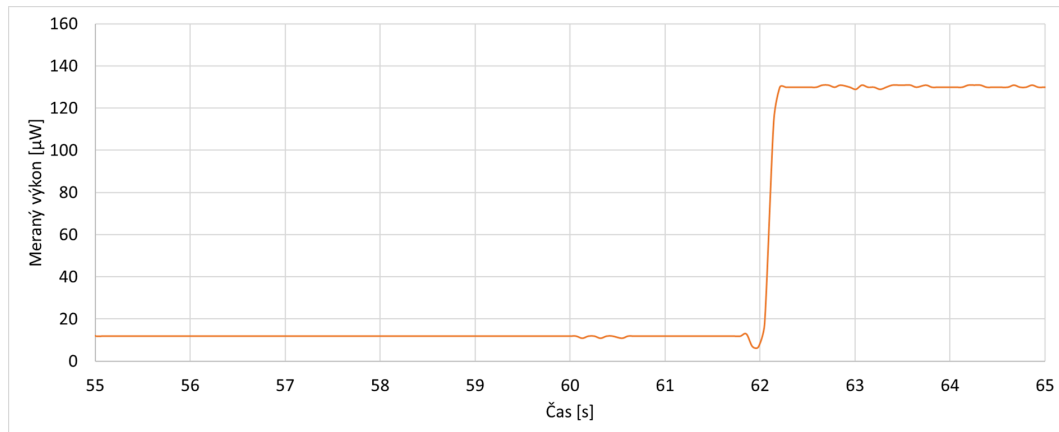
Obr. 6.16: Graf detekcie pri položení a odobratí 200 g závažia (1 km)



Obr. 6.17: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 200 g závažia (1 km)



Obr. 6.18: Graf polozenia 200 g závažia v 30 s (1 km)

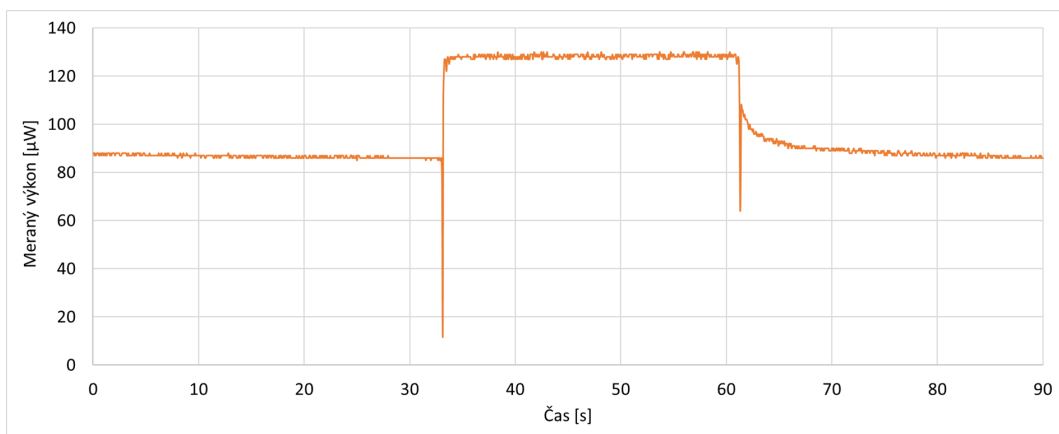


Obr. 6.19: Graf odobrania 200 g závažia v 60 s (1 km)

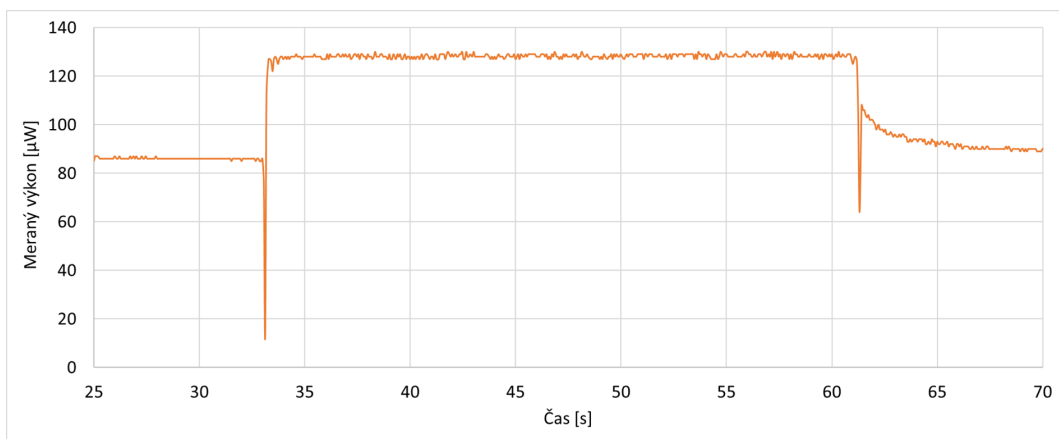
5. meranie – 1 km trasa a 500 g závažie

Piate a zároveň posledné meranie na 1 km trase bolo realizované pre 500 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polohy a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polohy závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

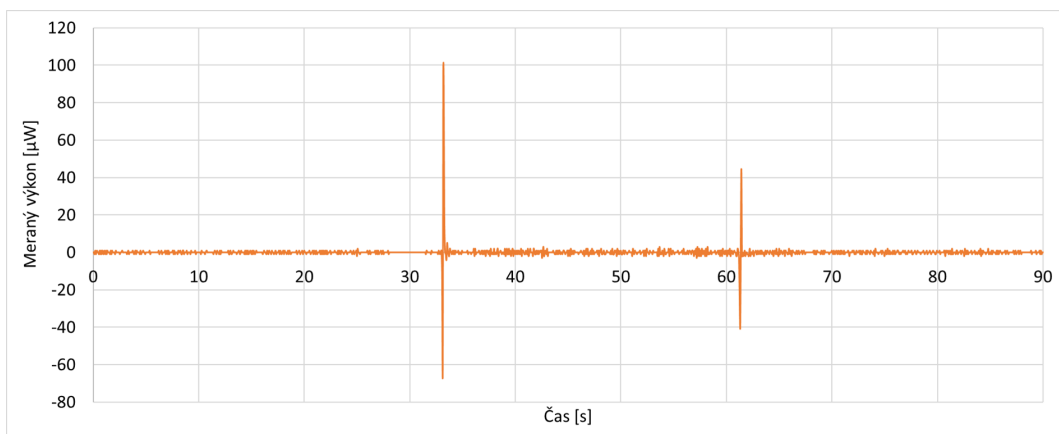
V prvom grafe možno vidieť že ustálená hodnota meraného výkonu bola $88 \mu\text{W}$, v 33 s prišlo k priloženiu závažia a nastal pokles výkonu na $12 \mu\text{W}$ a následne nárast výkonu na $127 \mu\text{W}$, závažie zostalo položené a výkon zostal na hodnote $127 \mu\text{W}$ až do doby kedy bolo v 61 s odobrané závažie a nastal pokles výkonu na $64 \mu\text{W}$, následne nastal nárast na $108 \mu\text{W}$, z tejto hodnoty výkon postupne klesal až na hodnotu $88 \mu\text{W}$. Pre lepšiu viditeľnosť detekcie polohy a odobrania závažia bol vytvorený tretí graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone, kde možno vidieť veľký rozdiel v 30 s, kde nastalo zníženie a následné zvýšenie výkonu a pri odobraní závažia v 60 s nastal pokles a hneď nato nárast výkonu. V treťom grafe je zobrazené približené polohy závažia v 33 s, kde možno vidieť detailnejšie pokles výkonu z 86 na $12 \mu\text{W}$ a následne navýšenie výkonu na $127 \mu\text{W}$. Štvrtý graf zobrazuje odobranie závažia v 61 s, kde možno vidieť pokles výkonu z 120 na $100 \mu\text{W}$. Posledné dva grafy, označené ako integračné, boli vytvorené z hodnôt zmeny vo výkone, ktoré boli následne určené ako absolútne číslo, na základe tejto hodnoty boli vytvorené tieto grafy, ktoré zobrazujú polohy a odobranie závažia.



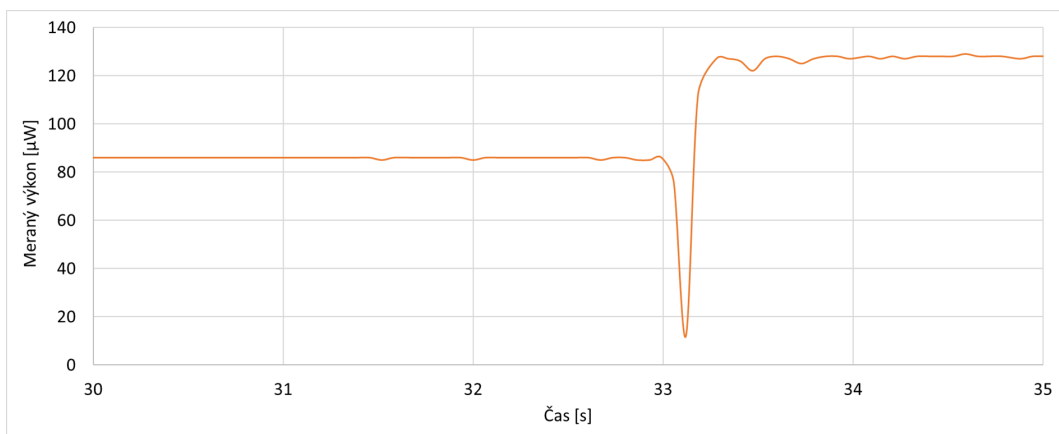
Obr. 6.20: Graf detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (1 km)



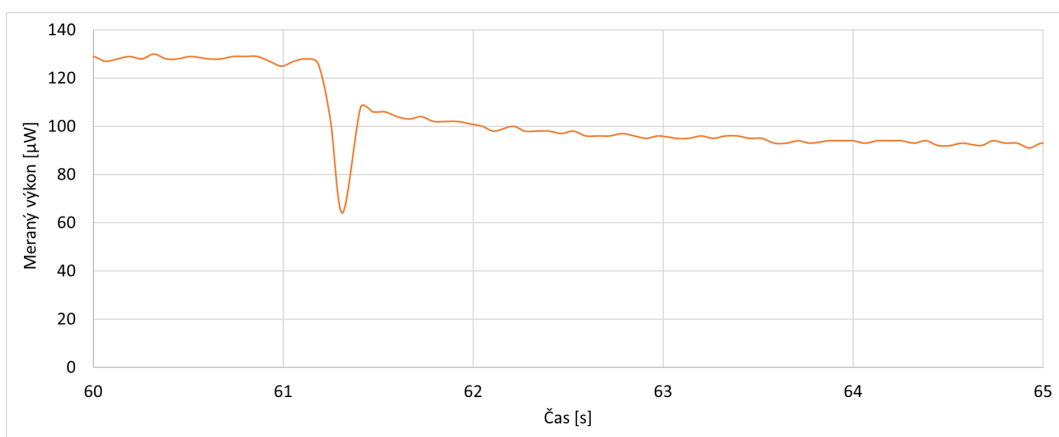
Obr. 6.21: Detailnejšie zobrazenie grafu detekcie pri položení a odobratí 20 g závažia (1 km)



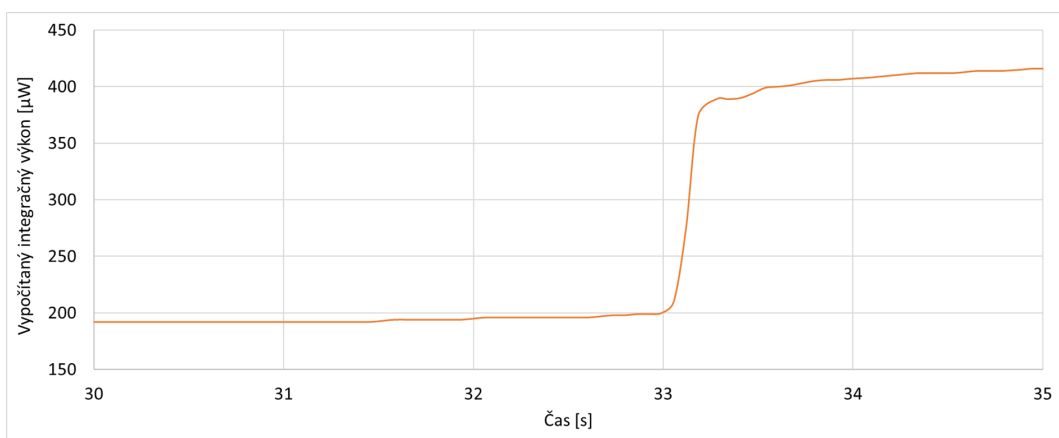
Obr. 6.22: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 500 g závažia (1 km)



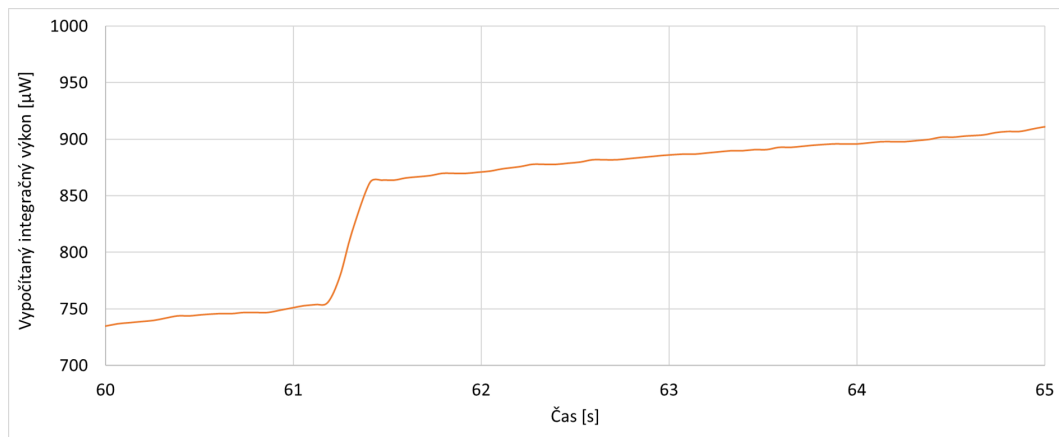
Obr. 6.23: Graf polozenia 500 g závažia v 30 s (1 km)



Obr. 6.24: Graf odobrania 500 g závažia v 60 s (1 km)



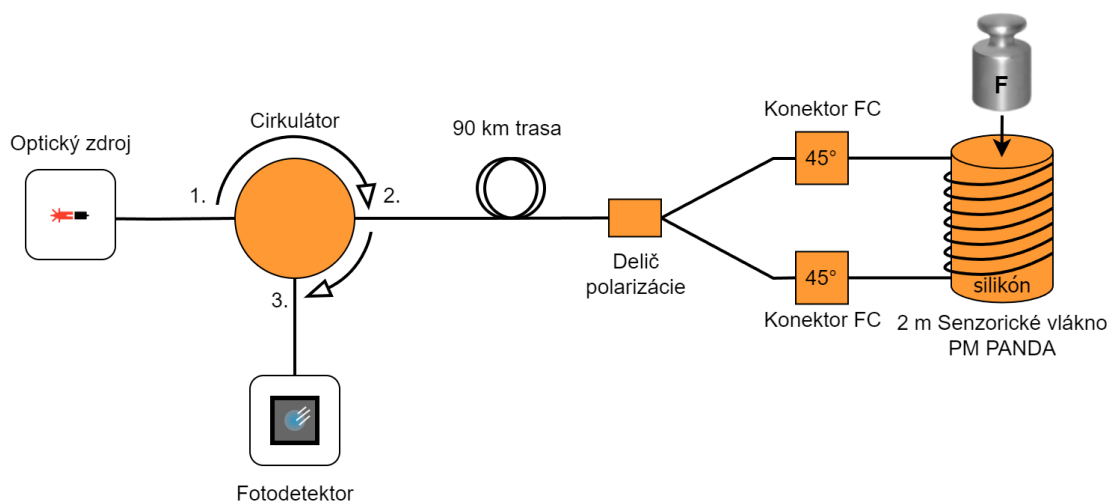
Obr. 6.25: Integračný graf pri položení 20 g závažia v 30 s (1 km)



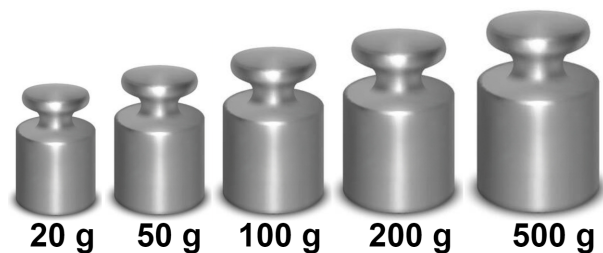
Obr. 6.26: Integračný graf pri odobraní 20 g závažia v 60 s (1 km)

6.1.2 Meranie na 50 km trase

Tieto merania sú realizované na 50 km optickej trase, schéma tejto trasy je zobrazená na obr. 6.27. Meranie bolo uskutočnené pre tieto typy závaží ako možno vidieť na obr. 6.28. Teplota v miestnosti bola 24°C.



Obr. 6.27: Schéma zapojenia pre 50 km trasu

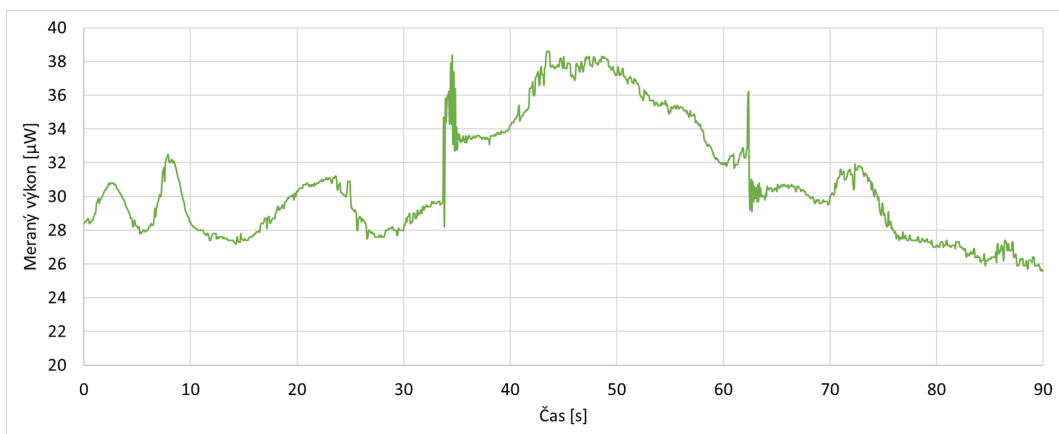


Obr. 6.28: Znárodnenie rôznych typov závaží pre 50 km trasu

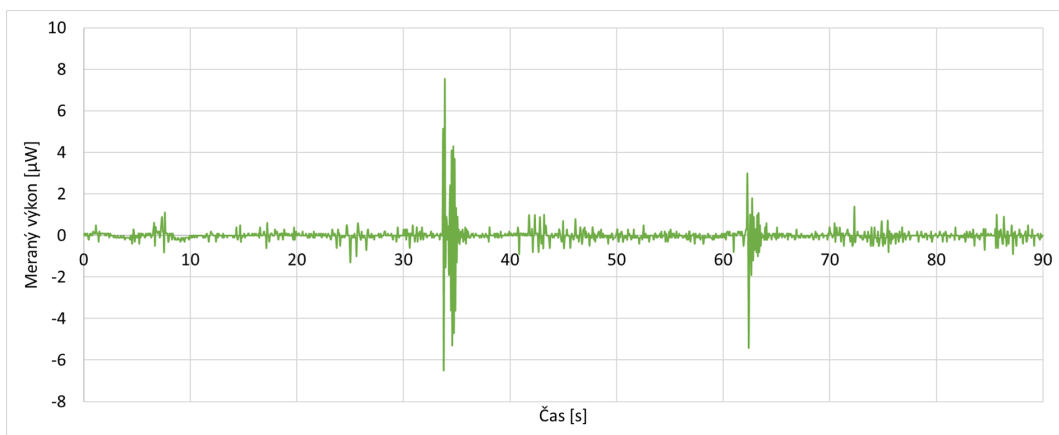
1. meranie – 50 km trasa a 20 g závašie

Prvé meranie na 50 km trase bolo realizované pre 20 g závašie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závašie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polozenia a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenie závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

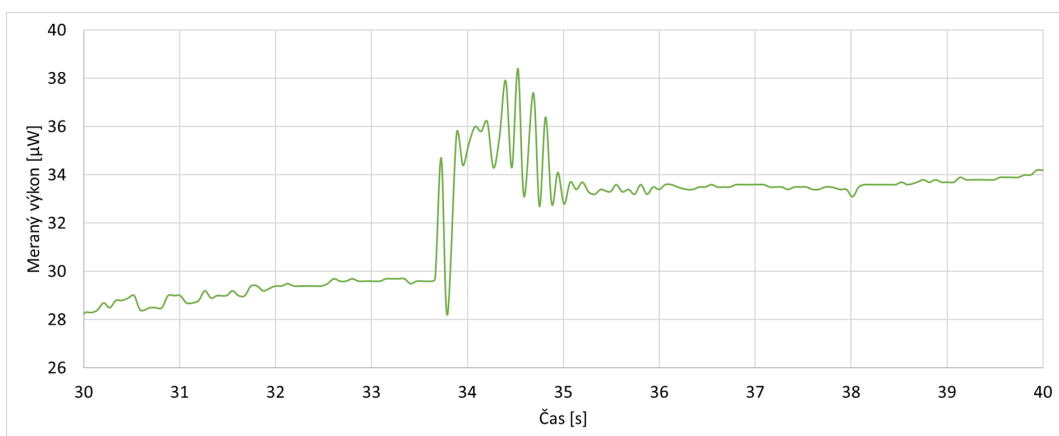
V prvom grafe možno vidieť že hodnota meraného výkonu kolísala približne medzi hodnotami 26 a 31 μW , v 34 s bolo položené závašie a nastal nárast výkonu, následne pokles výkonu a potom znovu nárast hodnoty. Závašie zostalo položené a výkon kolísal medzi hodnotami 34 a 31 μW . V 62 s bolo odobrané závašie a nastal pokles výkonu na 29 μW , následne výkon kolísal približne medzi hodnotami 30 a 25 μW . Nakoľko z tohto grafu nie je úplne jasne vidieť detekciu, ruší sa tu kolísanie, tak pre lepšiu viditeľnosť detekcie polozenia a odobrania závažia bol vytvorený druhý graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone. V tomto grafe možno jasne vidieť polozenie závažia v 34 s a odobranie závažia v 62 s. V treťom grafe je zobrazené polozenie závažia v 34 s, kde možno vidieť nárast z 30 μW na 35 μW . V poslednom grafe je zobrazené odobranie závažia v 61 s, výkon najskôr kolísal a pri odobraní závažia výkon narástol z 20 μW na 40 μW .



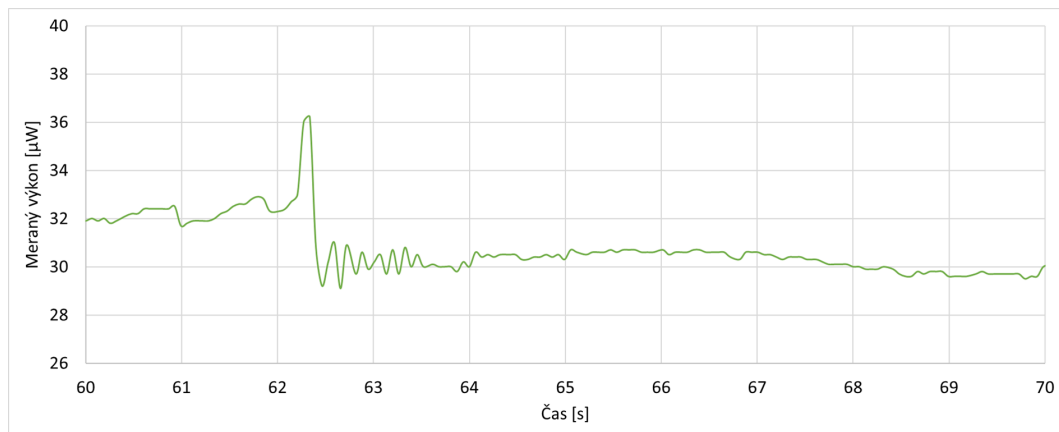
Obr. 6.29: Graf detekcie pri položení a odobratí 20 g závažia (50 km)



Obr. 6.30: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 20 g závažia (50 km)



Obr. 6.31: Graf polozenia 20 g závažia v 30 s (50 km)

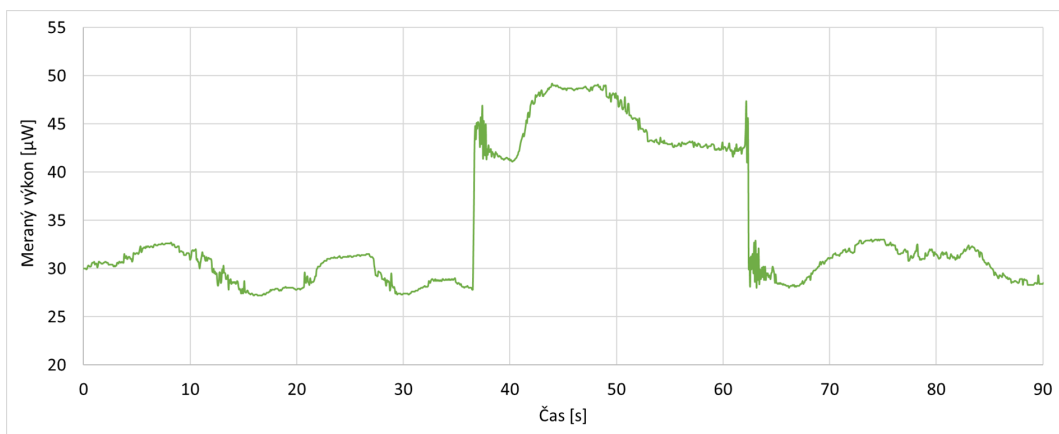


Obr. 6.32: Graf odobrania 20 g závažia v 60 s (50 km)

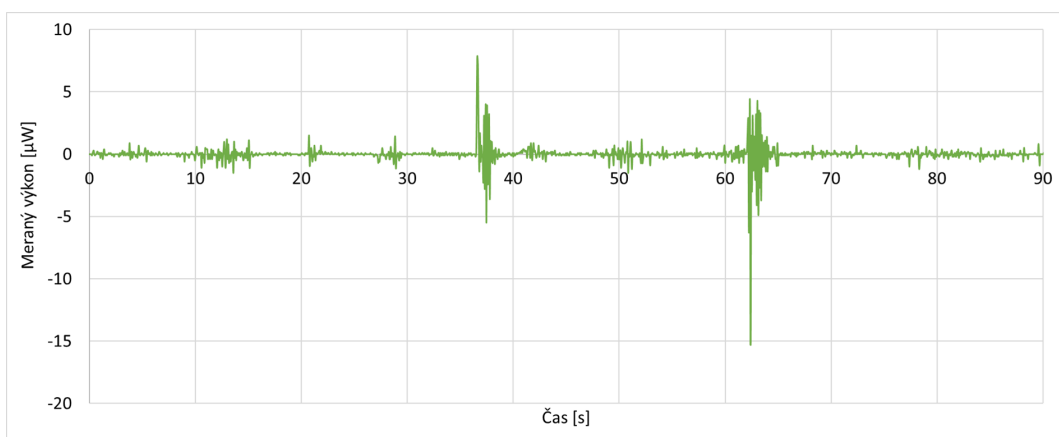
2. meranie – 50 km trasa a 50 g závažie

Druhé meranie na 50 km trase bolo realizované pre 50 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polohy a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polohy závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

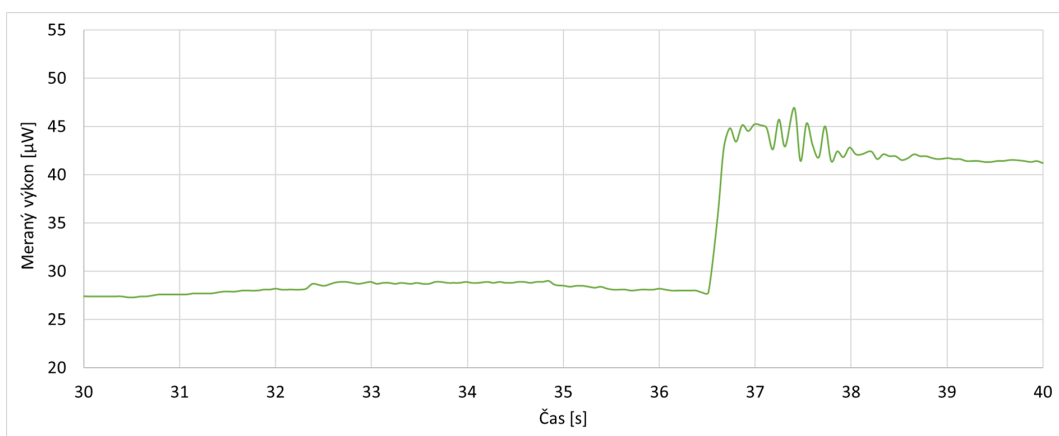
V prvom grafe možno vidieť že hodnota meraného výkonu kolísala približne medzi hodnotami 24 a 31 μW , v 34 s bolo položené závažie a nastal nárast výkonu, následne pokles výkonu a potom znovu nárast hodnoty. Závažie zostalo položené a výkon kolísal medzi hodnotami 34 a 31 μW . V 62 s bolo odobrané závažie a nastal pokles výkonu na 29 μW , následne výkon kolísal približne medzi hodnotami 30 a 25 μW . Nakoľko z tohto grafu nie je úplne jasne vidieť detekciu, ruší sa tu kolísanie, tak pre lepšiu viditeľnosť detekcie polohy a odobrania závažia bol vytvorený druhý graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone. V tomto grafe možno jasne vidieť polohy závažia v 34 s a odobranie závažia v 62 s. V treťom grafe je zobrazené približené polohy závažia v 34 s, kde možno vidieť nárast z 30 μW na 35 μW . Posledný graf zobrazuje odobranie závažia v 62 s, kde možno vidieť pokles výkonu z 42 μW na 30 μW .



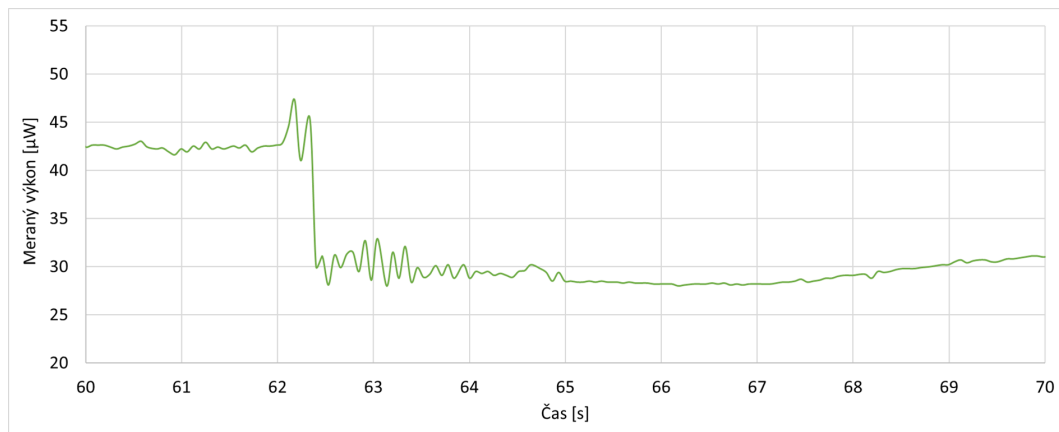
Obr. 6.33: Graf detekcie pri položení a odobratí 50 g závažia (50 km)



Obr. 6.34: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 50 g závažia (50 km)



Obr. 6.35: Graf polozenia 50 g závažia v 30 s (50 km)

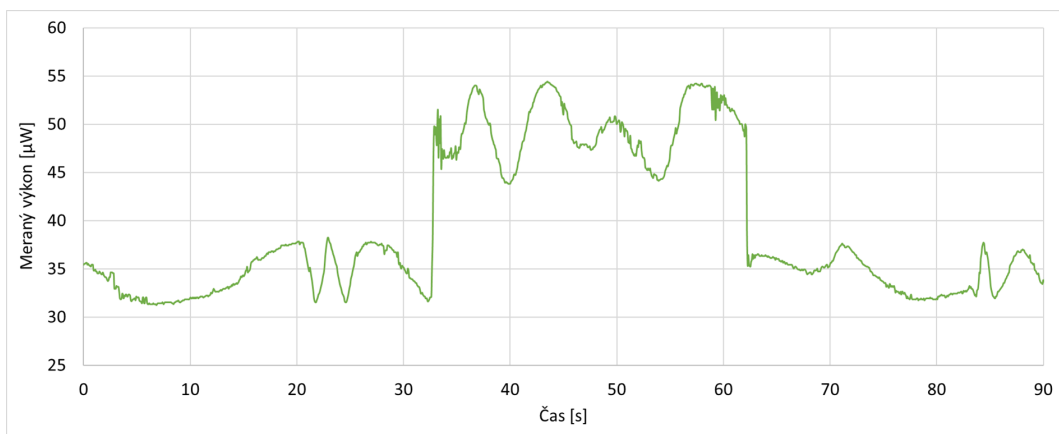


Obr. 6.36: Graf odobrania 50 g závažia v 60 s (50 km)

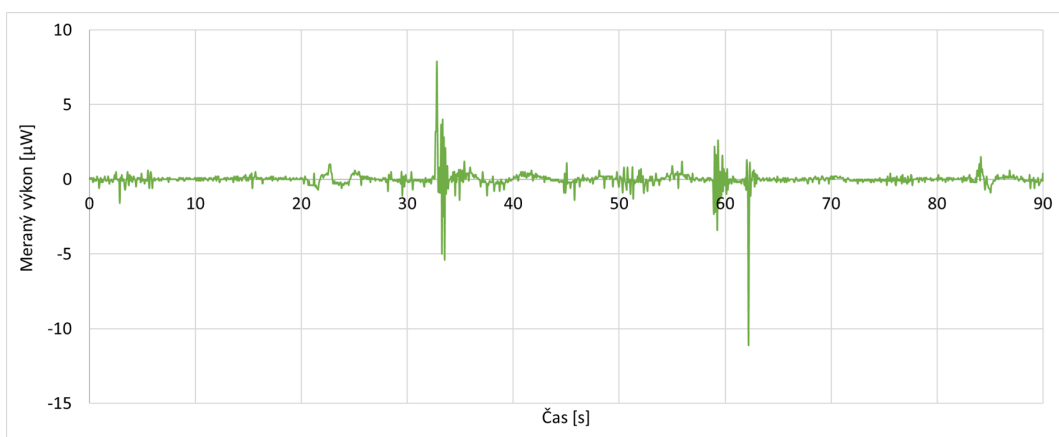
3. meranie – 50 km trasa a 100 g závažie

Tretie meranie na 50 km trase bolo realizované pre 100 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polohy a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polohy závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

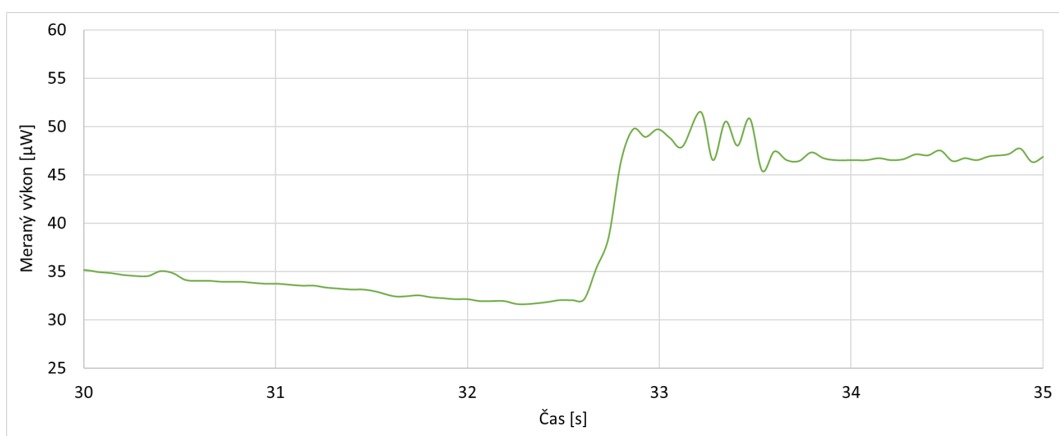
V prvom grafe možno vidieť že hodnota meraného výkonu kolísala približne medzi hodnotami 32 a 37 μW , v 33 s bolo položené závažie a nastal nárast výkonu. Závažie zostalo položené a výkon kolísal medzi hodnotami 45 a 54 μW . V 62 s bolo odobrané závažie a nastal pokles výkonu na 35 μW , následne výkon kolísal približne medzi hodnotami 32 a 37 μW . Nakoľko z tohto grafu nie je úplne jasne vidieť detekciu, ruší sa tu kolísanie, tak pre lepšiu viditeľnosť detekcie polohy a odobrania závažia bol vytvorený druhý graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone. V tomto grafe možno jasne vidieť polohy závažia v 33 s a odobranie závažia v 62 s. V treťom grafe je zobrazené približené polohy závažia v 33 s, kde možno vidieť nárast z 32 μW na 50 μW . Posledný graf zobrazuje odobranie závažia v 62 s, kde možno vidieť pokles výkonu z 53 μW na 36 μW .



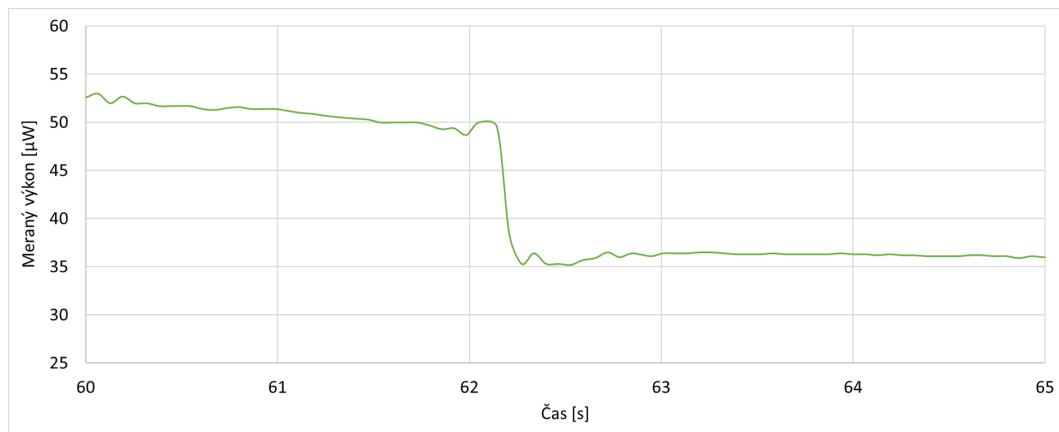
Obr. 6.37: Graf detekcie pri položení a odobratí 100 g závažia (50 km)



Obr. 6.38: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 100 g závažia (50 km)



Obr. 6.39: Graf polozenia 100 g závažia v 30 s (50 km)

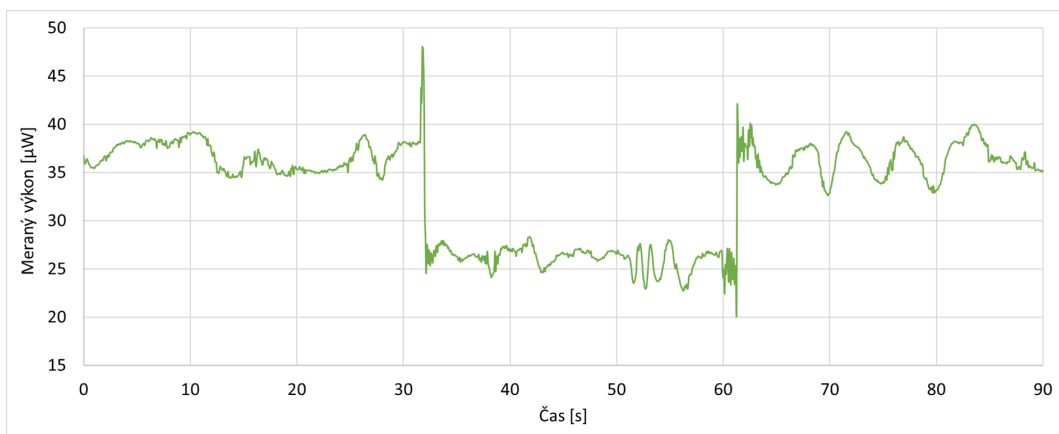


Obr. 6.40: Graf odobrania 100 g závažia v 60 s (50 km)

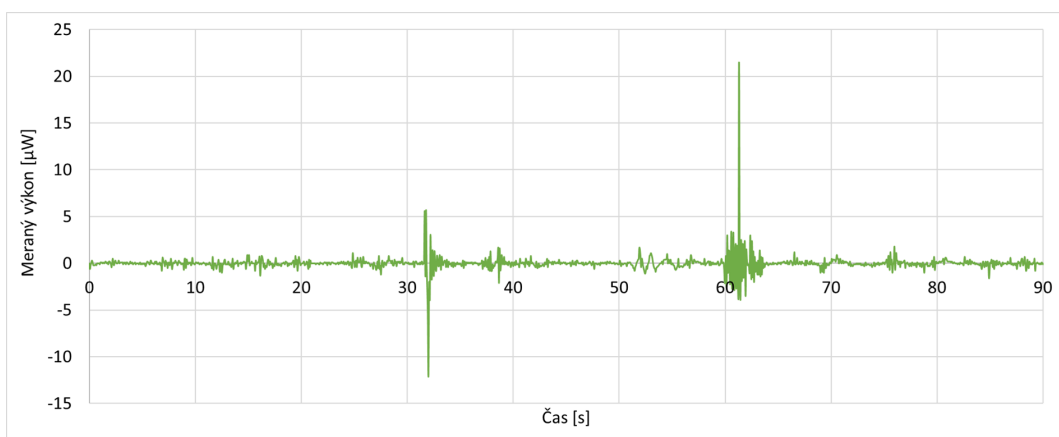
4. meranie – 50 km trasa a 200 g závažie

Štvrté meranie na 50 km trase bolo realizované pre 200 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polohy a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polohy závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

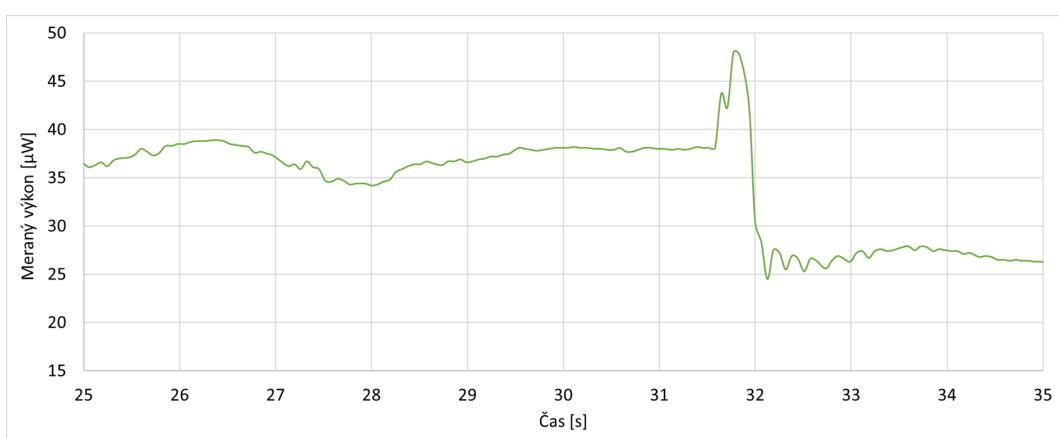
V prvom grafe možno vidieť že hodnota meraného výkonu kolísala približne medzi hodnotami 35 a 40 μW , v 32 s bolo položené závažie a nastal nárast výkonu. Závažie zostalo položené a výkon kolísal medzi hodnotami 22 a 27 μW . V 61 s bolo odobrané závažie a nastal nárast výkonu na 45 μW , následne výkon kolísal približne medzi hodnotami 33 a 38 μW . Nakoľko z tohto grafu nie je úplne jasne vidieť detekciu keďže ju ruší kolísanie výkonu, tak pre lepšiu viditeľnosť detekcie polohy a odobrania závažia bol vytvorený druhý graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone. V tomto grafe možno jasne vidieť polohy závažia v 32 s a odobranie závažia v 61 s. V treťom grafe je zobrazené priblížené polohy závažia v 32 s, kde možno vidieť nárast z 36 μW na 47 μW . Posledný graf zobrazuje odobranie závažia v 62 s, kde možno vidieť nárast výkonu z 20 μW na 43 μW .



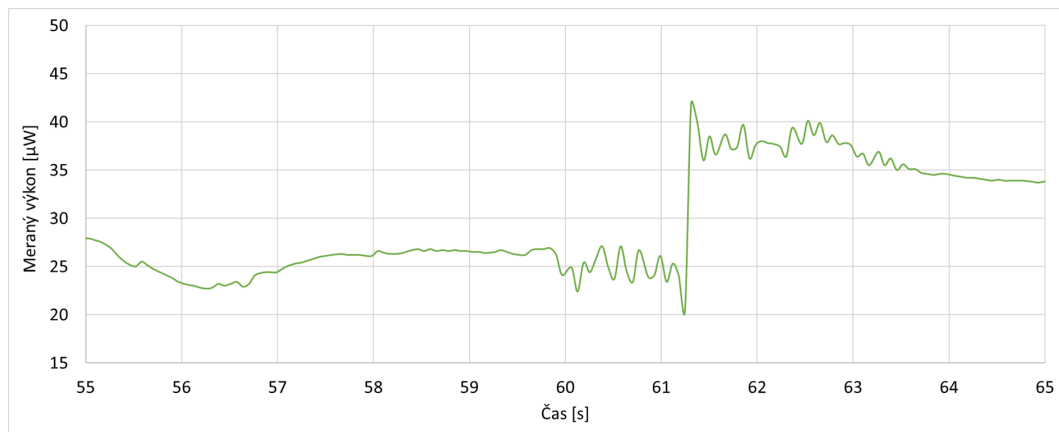
Obr. 6.41: Graf detekcie pri položení a odobratí 200 g závažia (50 km)



Obr. 6.42: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 200 g závažia (50 km)



Obr. 6.43: Graf polozenia 200 g závažia v 30 s (50 km)

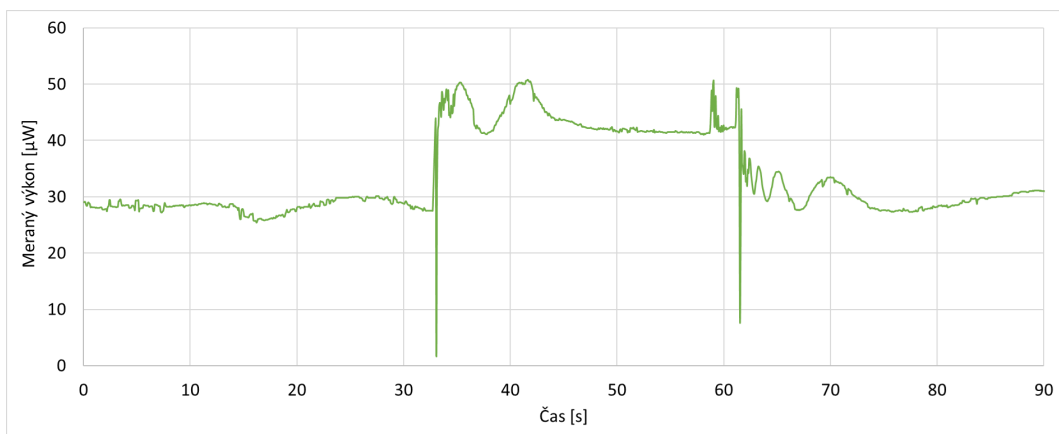


Obr. 6.44: Graf odobrania 200 g závažia v 60 s (50 km)

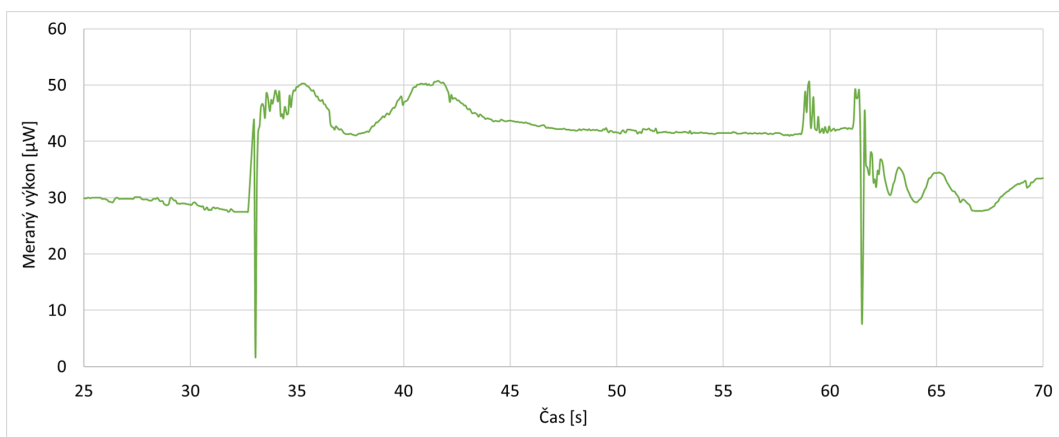
5. meranie – 50 km trasa a 500 g závažie

Piate a zároveň posledné meranie na 50 km trase bolo realizované pre 500 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polozenia a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenie závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

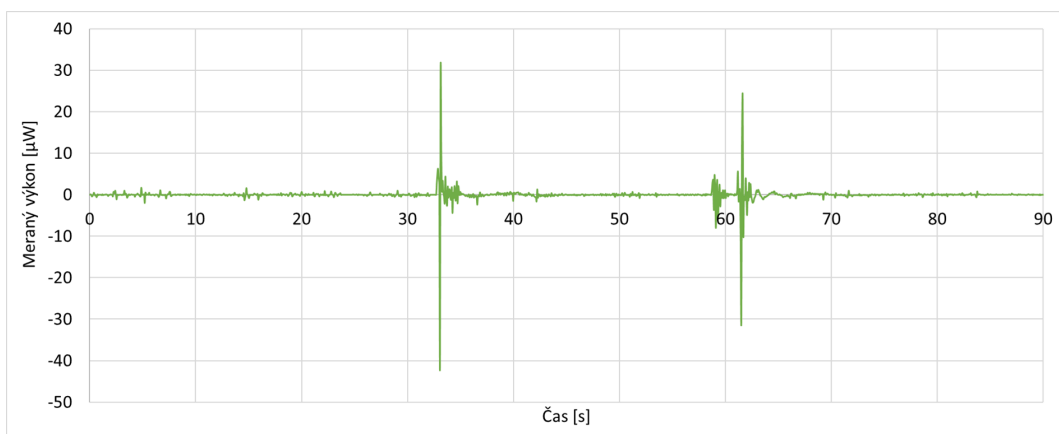
V prvom grafe možno vidieť že ustálená hodnota meraného výkonu bola $29 \mu\text{W}$, v 33 s prišlo k priloženiu závažia a nastal najskôr pokles a následne nárast výkonu. Závažie zostalo položené a výkon bol ustálený na hodnote $42 \mu\text{W}$ až do doby kedy bolo v 61 s odobrané závažie a nastal pokles výkonu na $10 \mu\text{W}$ a následne nastal nárast na $34 \mu\text{W}$. Pre lepšiu viditeľnosť detekcie polozenia a odobrania závažia bol vytvorený tretí graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone, kde možno vidieť veľký rozdiel v 33 s, kde nastal pokles a následné nárast výkonu a pri odobraní závažia v 61 s nastal pokles a hneď nato nárast výkonu. V štvrtom grafe je zobrazené približené polozenie závažia v 33 s. Piaty graf zobrazuje odobranie závažia v 61 s. Posledné dva grafy, označené ako integračné, boli vytvorené z hodnôt zmeny vo výkone, ktoré boli následne určené ako absolútne číslo, na základe tejto hodnoty boli vytvorené tieto grafy, ktoré zobrazujú polozenie a odobranie závažia.



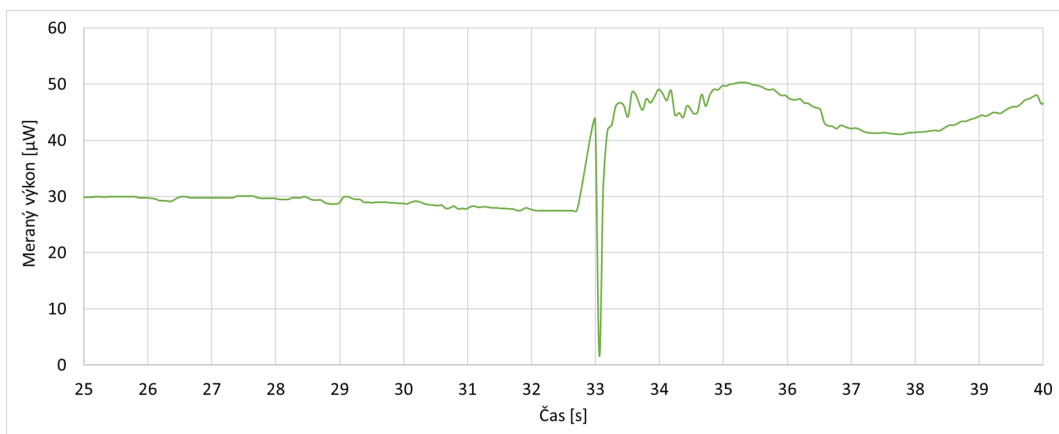
Obr. 6.45: Graf detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (50 km)



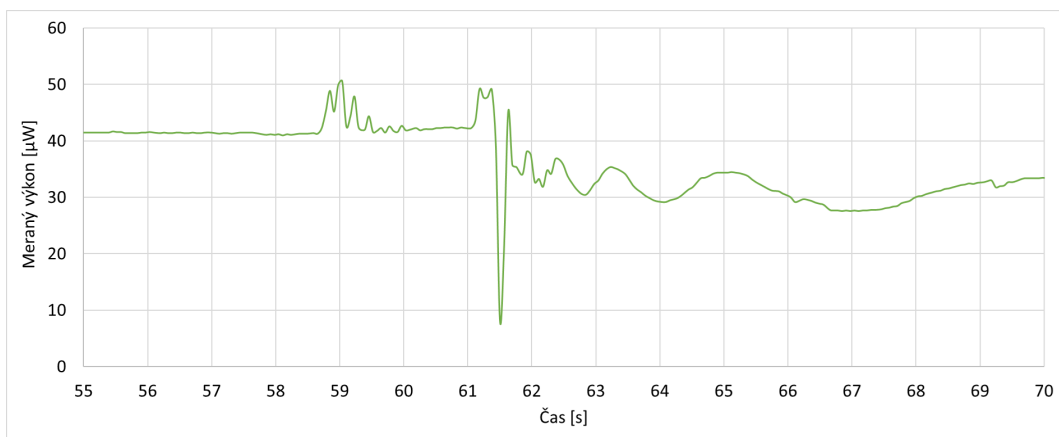
Obr. 6.46: Detailnejšie zobrazenie grafu detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (50 km)



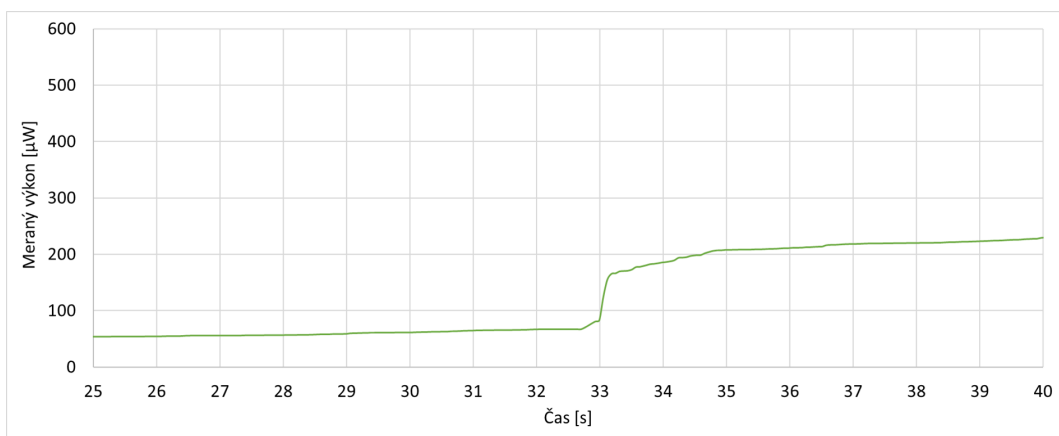
Obr. 6.47: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 500 g závažia (50 km)



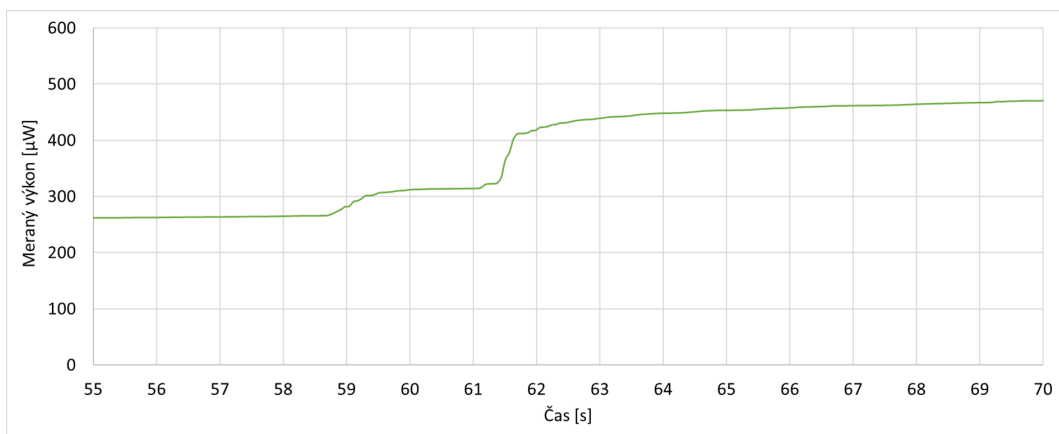
Obr. 6.48: Graf polozenia 500 g závažia v 30 s (50 km)



Obr. 6.49: Graf odobrania 500 g závažia v 60 s (50 km)



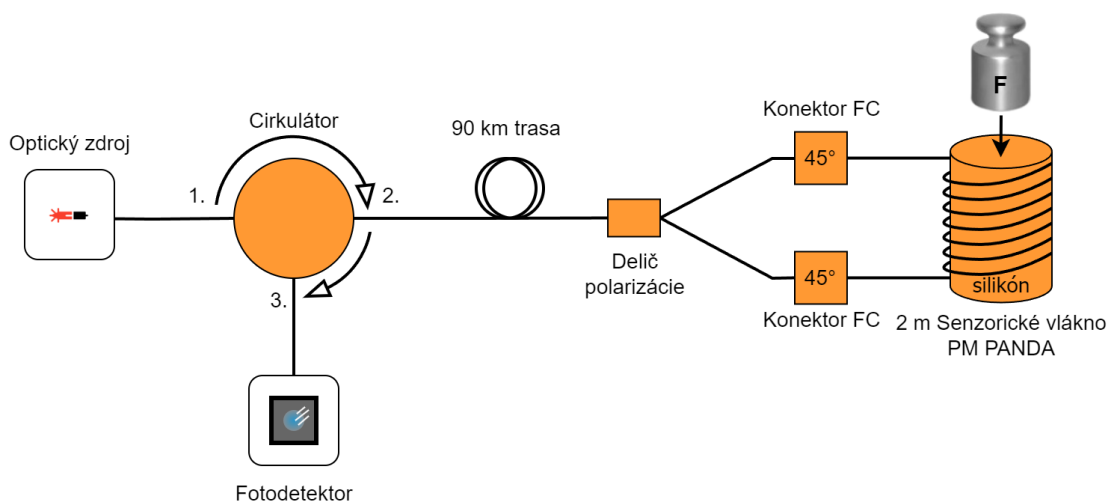
Obr. 6.50: Integračný graf pri položení 500 g závažia (50 km)



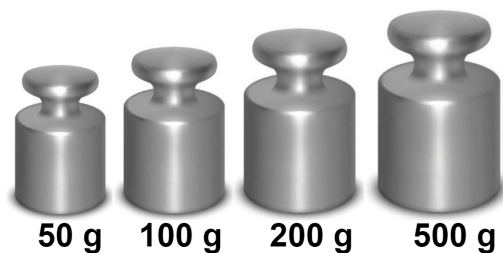
Obr. 6.51: Integrovaný graf pri odobraní 500 g závažia (50 km)

6.1.3 Meranie na 90 km trase

Tieto merania sú realizované na 90 km optickej trase, schéma tejto trasy je zobrazená na obr. 6.52. Meranie bolo uskutočnené pre tieto typy závaží ako možno vidieť na obr. 6.53. Teplota v miestnosti bola 24°C .



Obr. 6.52: Schéma zapojenia pre 90 km trasu

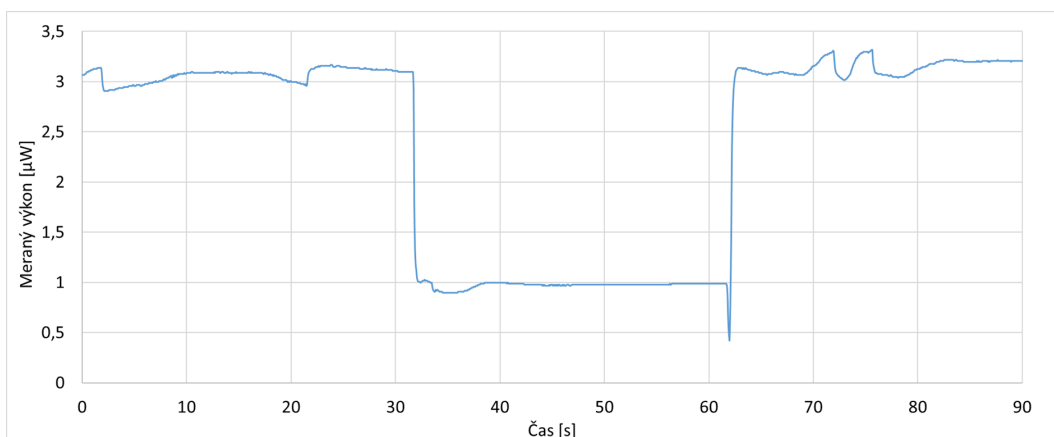


Obr. 6.53: Znázornenie rôznych typov závaží pre 90 km trasu

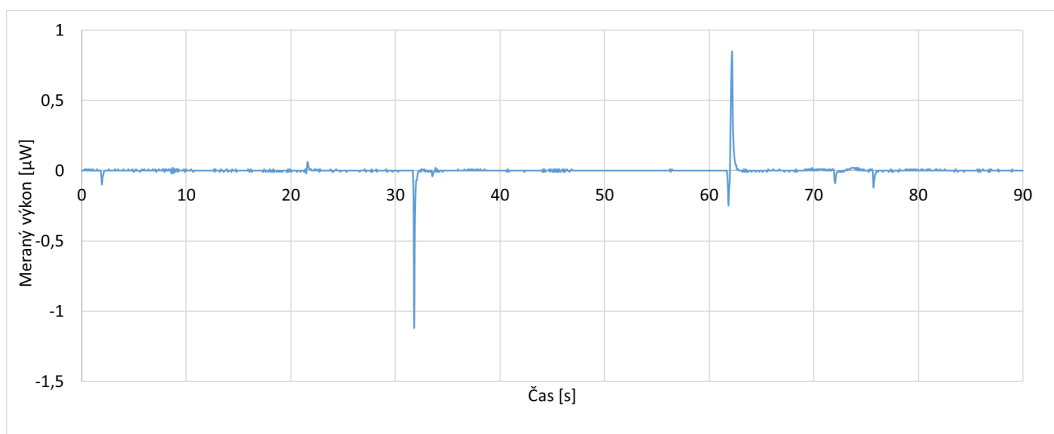
1. meranie – 90 km trasa a 50 g závažie

Prvé meranie na 90 km trase bolo realizované pre 50 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polozenia a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenie závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

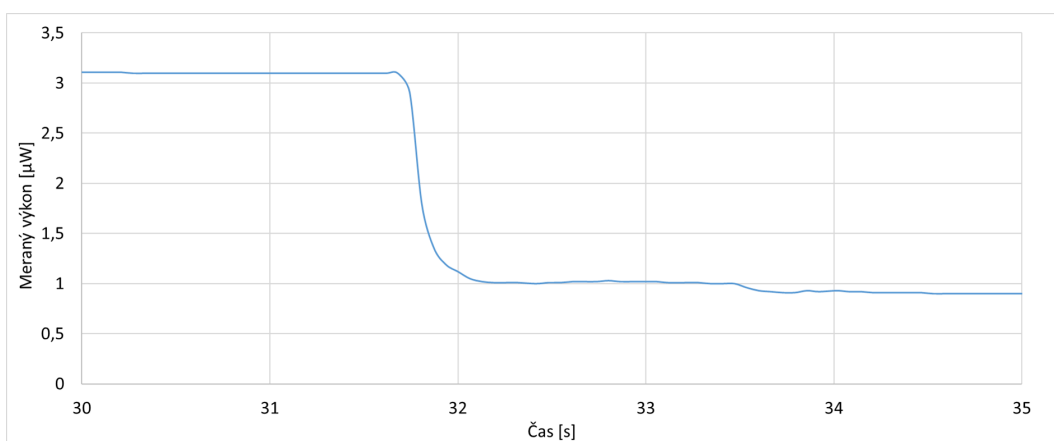
V prvom grafe možno vidieť že hodnota meraného výkonu kolísala približne medzi hodnotami 3 a 3,3 μW , v 32 s bolo položené závažie a nastal pokles výkonu. Závažie zostalo položené a výkon bol ustálený na hodnote 1 μW . V 62 s bolo odobrané závažie a nastal pokles výkonu na 0,5 μW a následne nastal nárast výkonu na 3 μW . Pre lepšiu viditeľnosť detekcie polozenia a odobrania závažia bol vytvorený druhý graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone. V tomto grafe možno jasne vidieť polozenie závažia v 32 s a odobranie závažia v 62 s. V treťom grafe je zobrazené polozenie závažia v 32 s, kde možno vidieť pokles z 3,1 μW na 1 μW . V poslednom grafe je zobrazené odobranie závažia v 61 s, výkon najskôr klesol na hodnotu 0,5 a následne narástol na 3,1 μW .



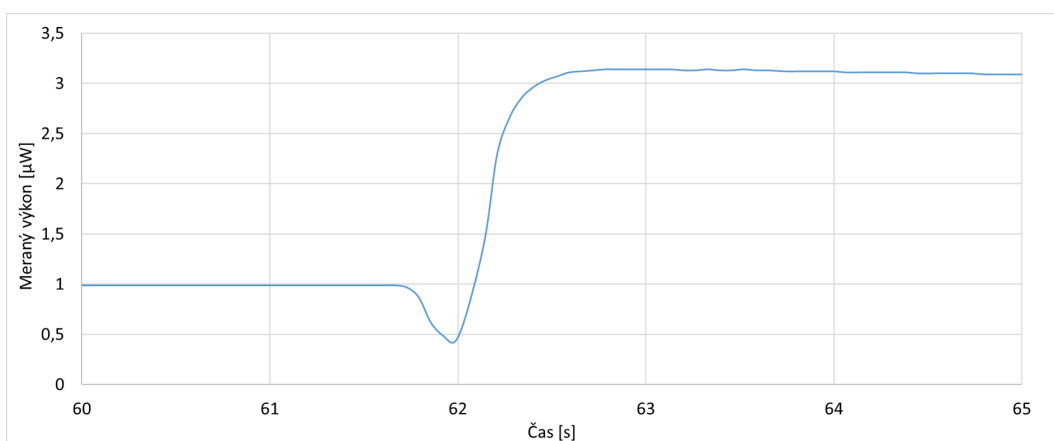
Obr. 6.54: Graf detekcie pri položení a odobratí 50 g závažia (90 km)



Obr. 6.55: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 50 g závažia (90 km)



Obr. 6.56: Graf polozenia 50 g závažia v 30 s (90 km)

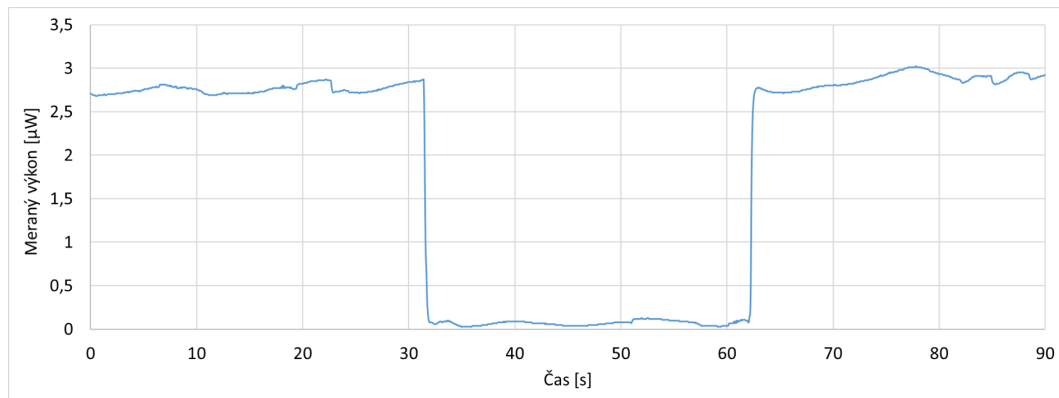


Obr. 6.57: Graf odobrania 50 g závažia v 60 s (90 km)

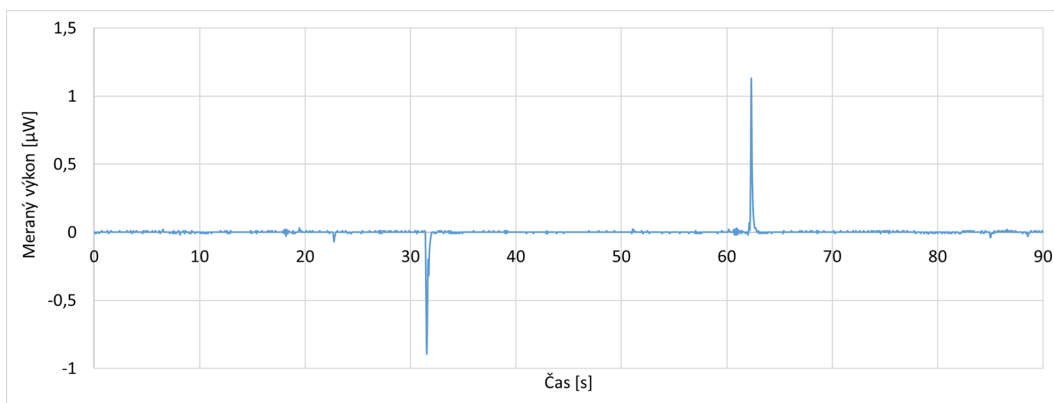
2. meranie – 90 km trasa a 100 g závažie

Druhé meranie na 90 km trase bolo realizované pre 100 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polozenia a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenie závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

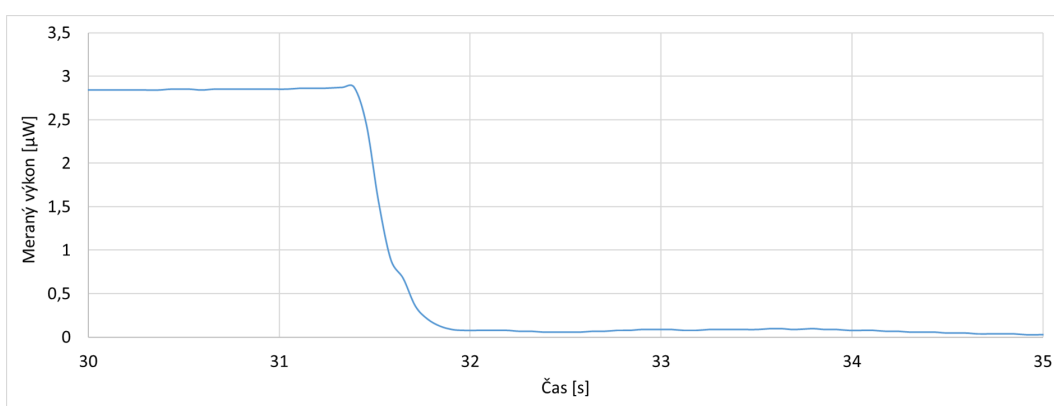
V prvom grafe možno vidieť že hodnota meraného výkonu kolísala približne medzi hodnotami 2,7 a 2,6 μW , v 32 s bolo položené závažie a nastal pokles výkonu. Závažie zostalo položené a výkon bol ustálený na hodnote 0,1 μW . V 62 s bolo odobrané závažie a nastal nárast výkonu na 2,7 μW . Pre lepšiu viditeľnosť detekcie polozenia a odobrania závažia bol vytvorený druhý graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone. V tomto grafe možno jasne vidieť polozenie závažia v 32 s a odobranie závažia v 62 s. V treťom grafe je zobrazené polozenie závažia v 32 s, kde možno vidieť pokles z 3,1 μW na 0,1 μW . V poslednom grafe je zobrazené odobranie závažia v 62 s, výkon narástol na 2,7 μW .



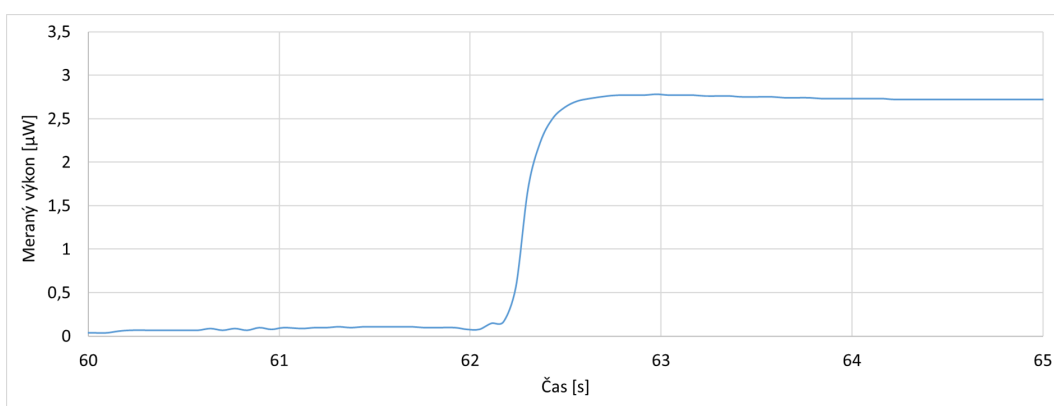
Obr. 6.58: Graf detekcie pri položení a odobratí 100 g závažia (90 km)



Obr. 6.59: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 100 g závažia (90 km)



Obr. 6.60: Graf polozenia 100 g závažia v 30 s (90 km)



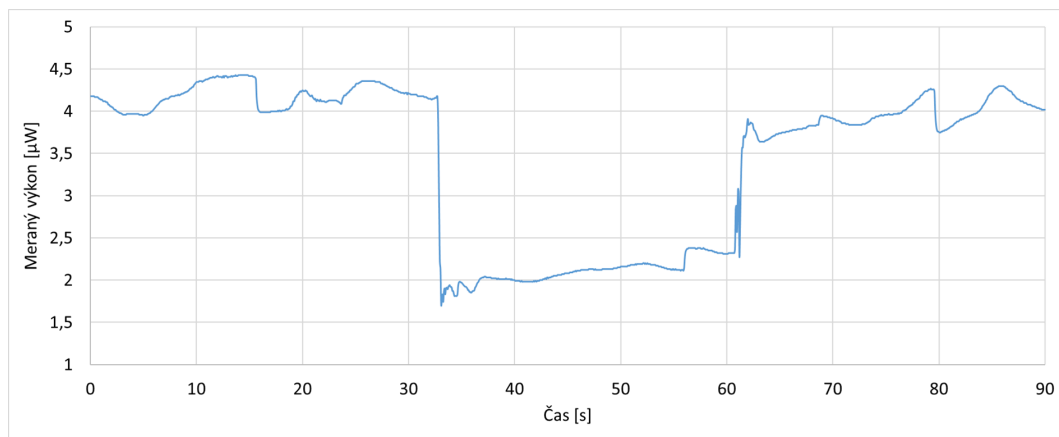
Obr. 6.61: Graf odobrania 100 g závažia v 60 s (90 km)

3. meranie – 90 km trasa a 200 g závažie

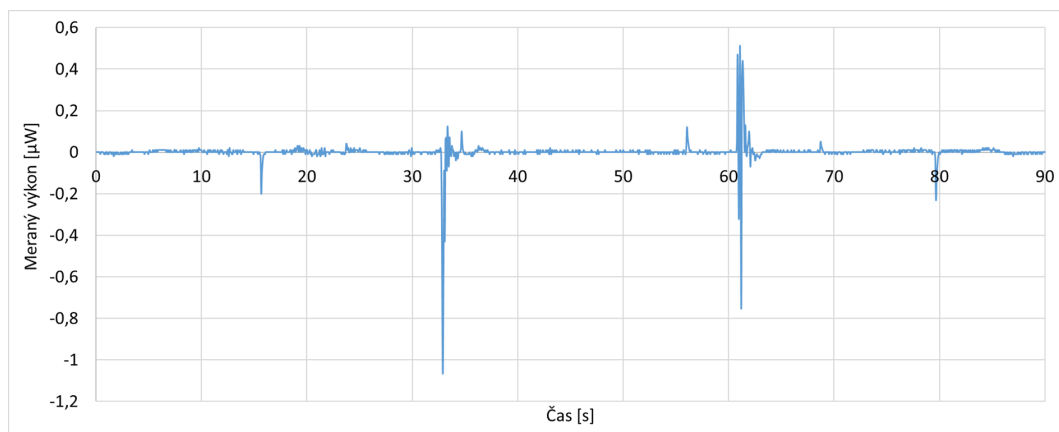
Tretie meranie na 90 km trase bolo realizované pre 200 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový

valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polohy a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polohy závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

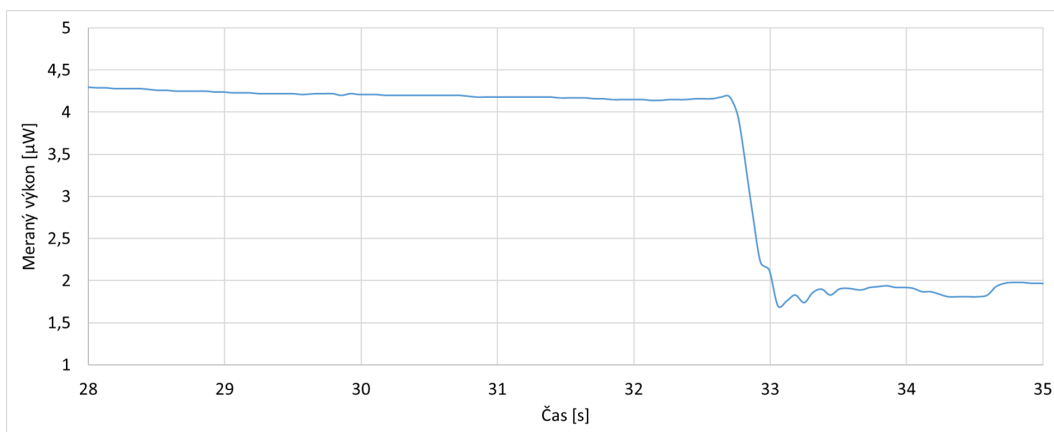
V prvom grafe možno vidieť že hodnota meraného výkonu kolísala približne medzi hodnotami 4,4 a 4 μW , v 33 s bolo položené závažia a nastal pokles výkonu. Závažia zostalo položené a výkon bol kolísal na hodnotách 1,8 a 2,2 μW . V 61 s bolo odobrané závažia a nastal nárast výkonu na 3,8 μW . Pre lepšiu viditeľnosť detekcie polohy a odobrania závažia bol vytvorený druhý graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone. V tomto grafe možno jasne vidieť polohy závažia v 33 s a odobranie závažia v 61 s. V treťom grafe je zobrazené polohy závažia v 33 s, kde možno vidieť pokles z 4,3 μW na 1,8 μW . V poslednom grafe je zobrazené odobranie závažia v 61 s, výkon narástol na 3,6 μW .



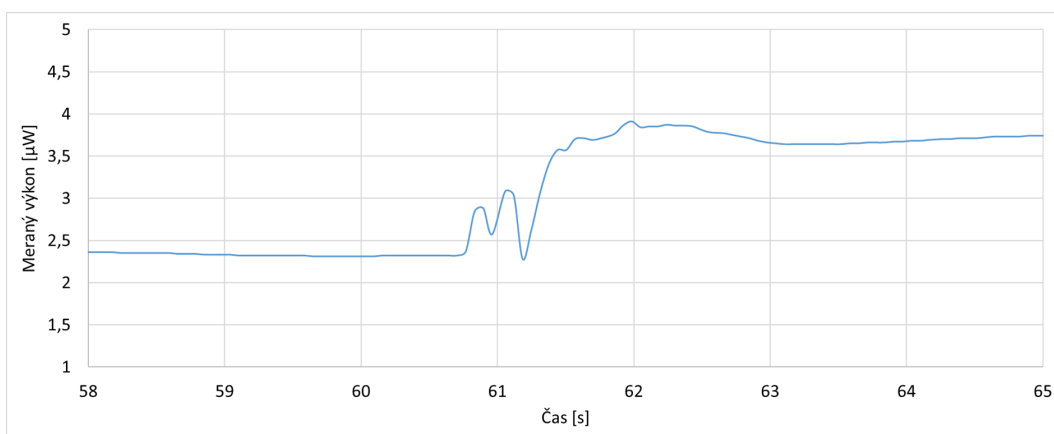
Obr. 6.62: Graf detekcie pri položení a odobratí 200 g závažia (90 km)



Obr. 6.63: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 200 g závažia (90 km)



Obr. 6.64: Graf polozenia 200 g závažia v 30 s (90 km)



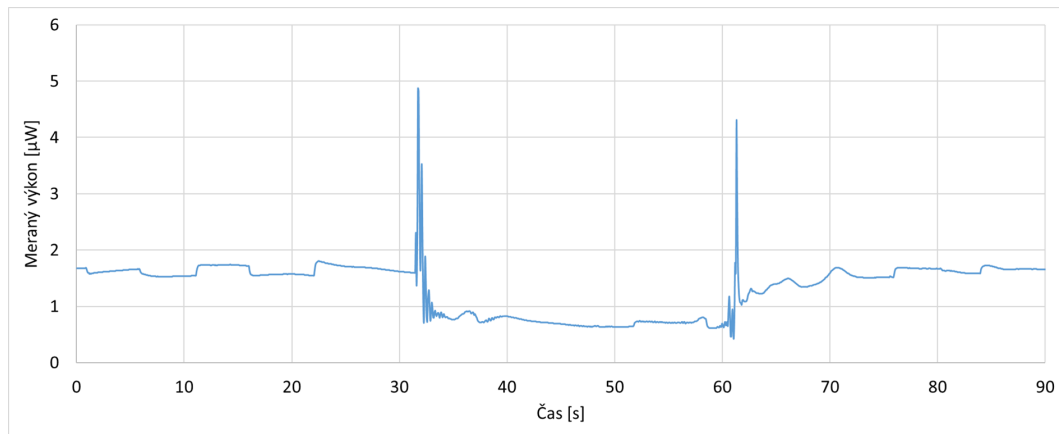
Obr. 6.65: Graf odobrania 200 g závažia v 60 s (90 km)

4. meranie – 90 km trasa a 500 g závažie

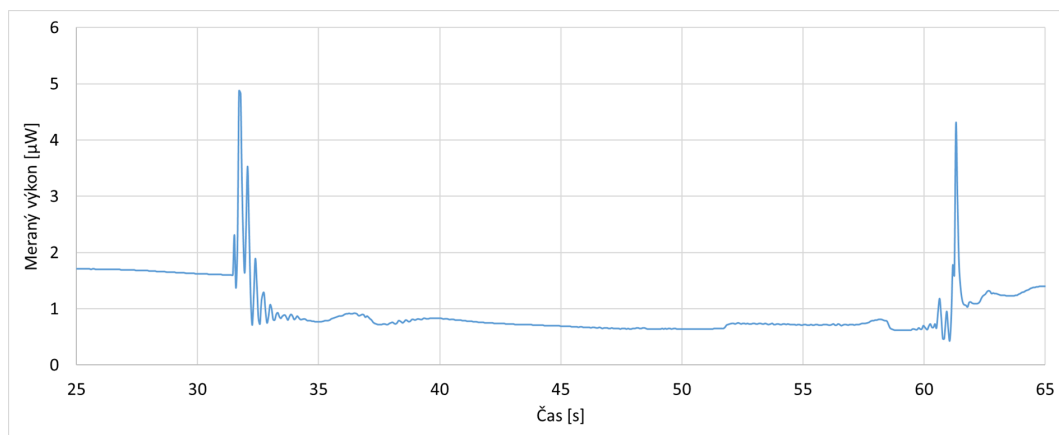
Štvrté a zároveň posledné meranie na 90 km trase bolo realizované pre 500 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polozenia a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenie závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

V prvom grafe možno vidieť že ustálená hodnota meraného výkonu bola $1,7 \mu\text{W}$, v 32 s prišlo k priloženiu závažia a nastal najskôr nárast a následne pokles výkonu. Závažie zostalo položené a výkon bol ustálený na hodnote $0,9 \mu\text{W}$ až do doby kedy bolo v 61 s odobrané závažie a nastal nárast výkonu na $5 \mu\text{W}$. Následne nastal pokles na $0,9 \mu\text{W}$. Druhý graf je prakticky rovnaký, je na ňom zmenená len časová os od 25 s po 65 s, pre lepšiu viditeľnosť a prehľadnosť tohto merania. Pre viditeľnosť detekcie

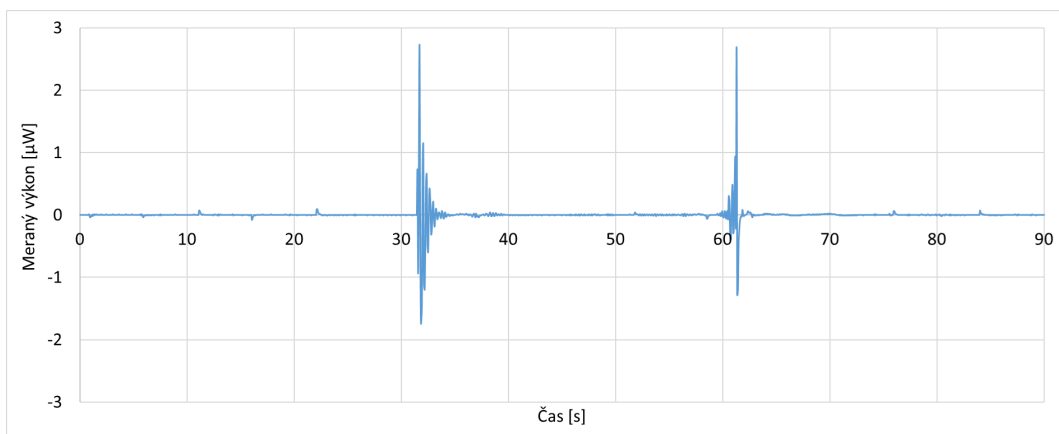
položenia a odobrania závažia bol vytvorený redundantný graf, ktorý je vytvorený pomocou rozdielov vo výkone, kde možno vidieť veľký rozdiel v 32 s, kde nastal nárast a následné pokles výkonu pri odobraní závažia v 61 s nastal nárast a hneď nato pokles výkonu. V treťom grafe je zobrazené priblížené polozenie závažia v 32 s. Štvrtý graf zobrazuje odobranie závažia v 61 s. Posledné dva grafy, označené ako integračné, boli vytvorené z hodnôt zmeny vo výkone, ktoré boli následne určené ako absolútne číslo, na základe tejto hodnoty boli vytvorené tieto grafy, ktoré zobrazujú polozenie a odobranie závažia.



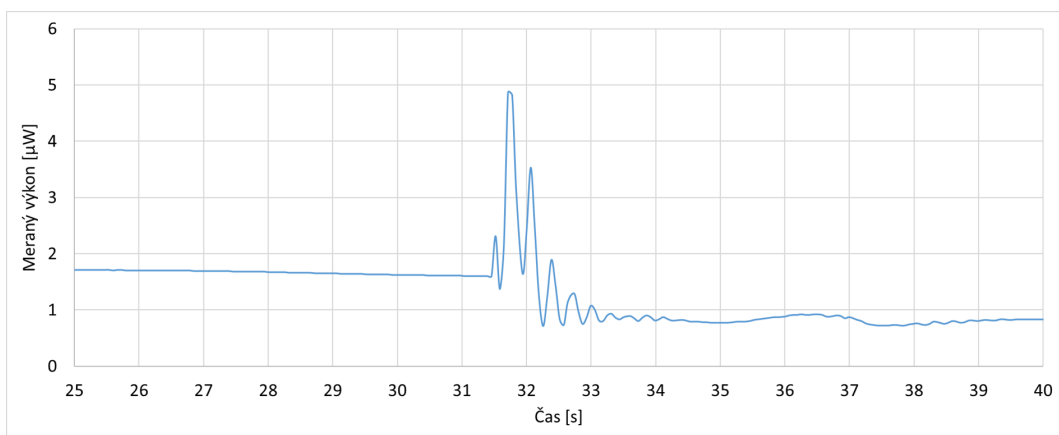
Obr. 6.66: Graf detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (90 km)



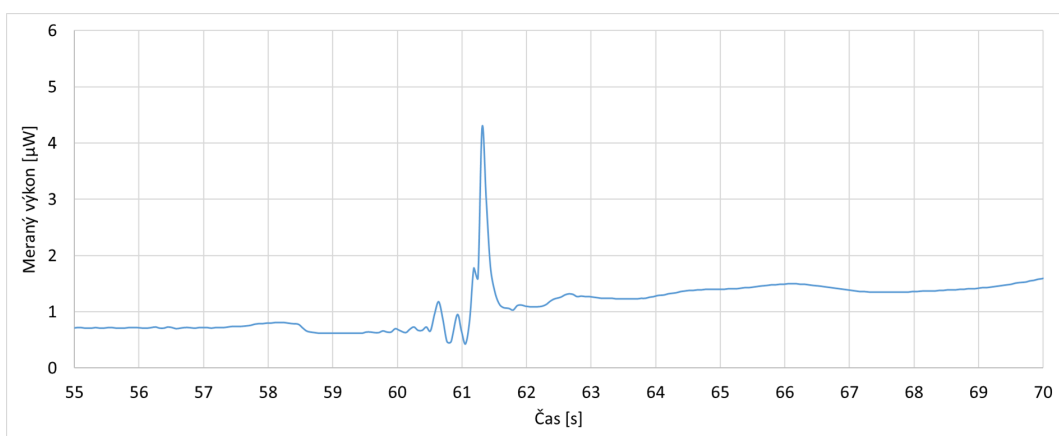
Obr. 6.67: Detailnejšie zobrazenie grafu detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (90 km)



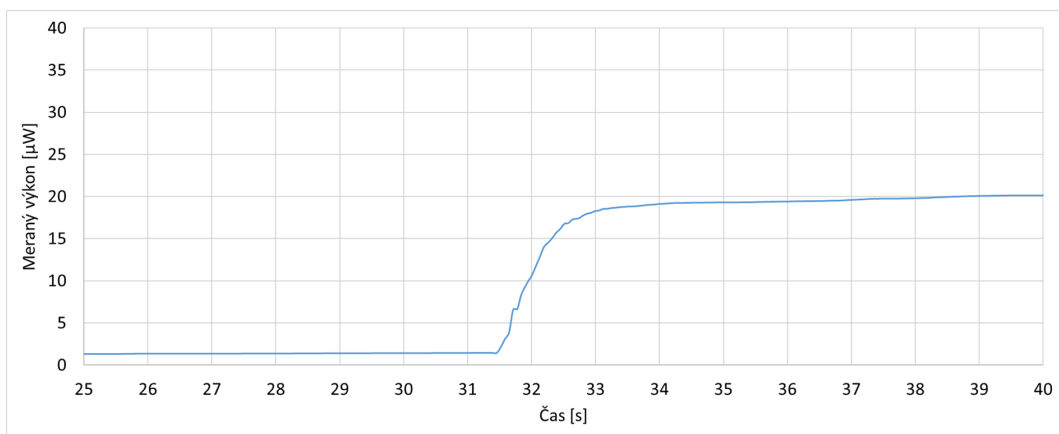
Obr. 6.68: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 500 g závažia (90 km)



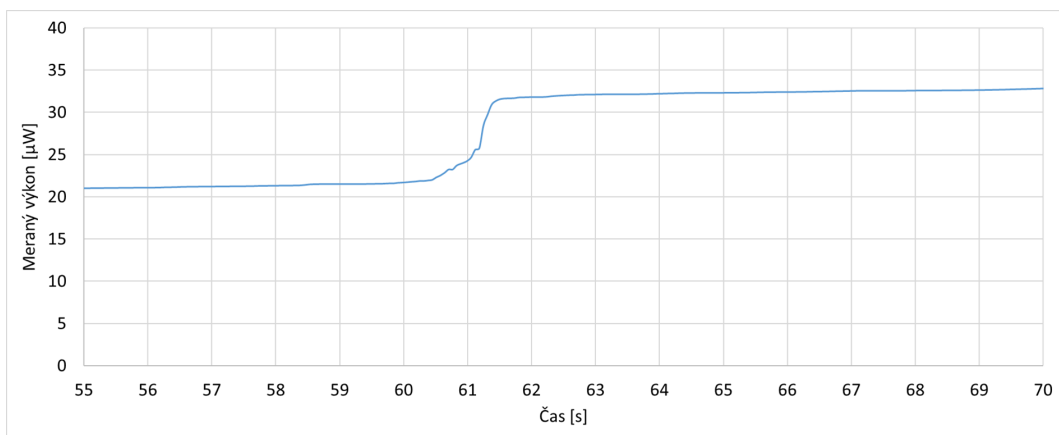
Obr. 6.69: Graf polozenia 500 g závažia v 30 s (90 km)



Obr. 6.70: Graf odobrania 500 g závažia v 60 s (90 km)



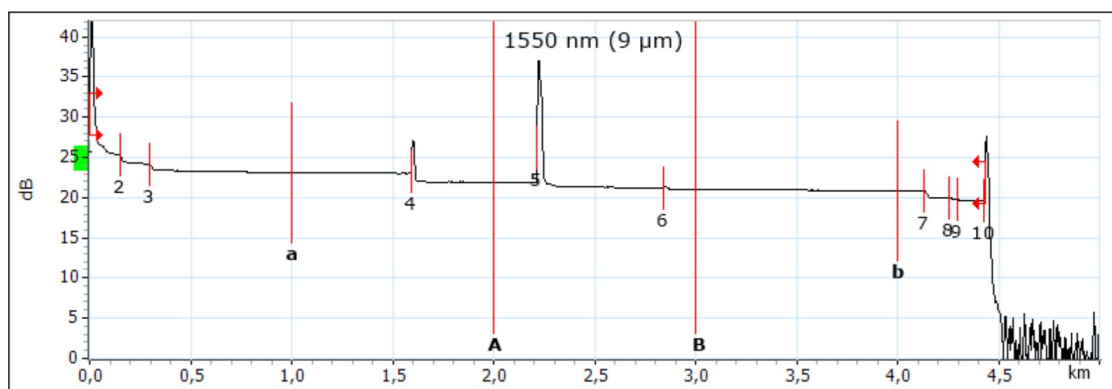
Obr. 6.71: Integrovaný graf pri položení 500 g závažia (90 km)



Obr. 6.72: Integrovaný graf pri odobraní 500 g závažia (90 km)

6.1.4 Meranie na reálnej trase

Reálna trasa o dĺžke 4,5 km bola podrobená meraniu pomocou OTDR, aby bola analyzovaná jej optická charakteristika a následná identifikácia prípadných problémov na tejto trase. Meranie bolo uskutočnené na vlnovej dĺžke 1550 nm. Výstupný graf z merania pomocou OTDR je zobrazený na obr. 6.73. Trasa vedie z Univerzity obrany na Masarykovu univerzitu a následne späť na Univerzitu obrany.

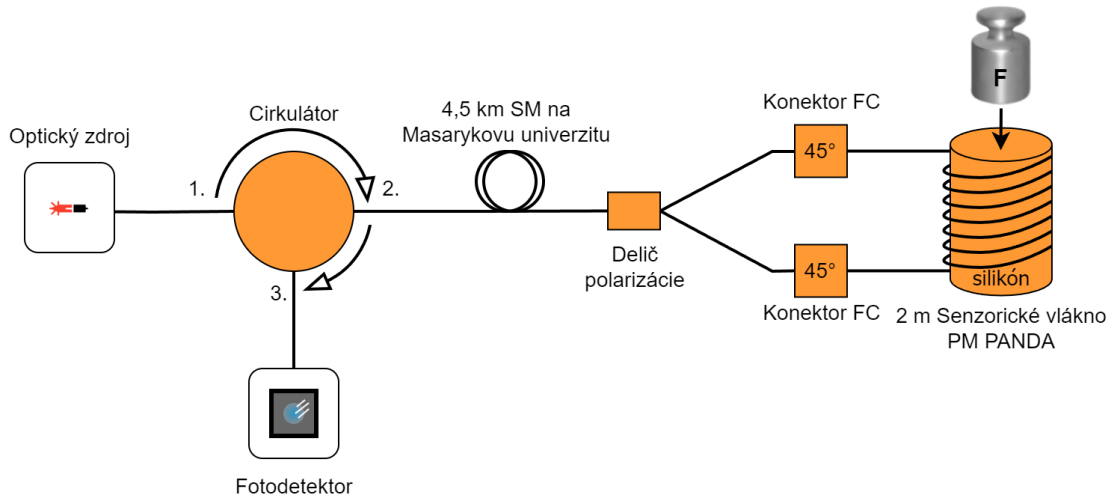


Obr. 6.73: OTDR graf pre 4,5 km reálnu trasu

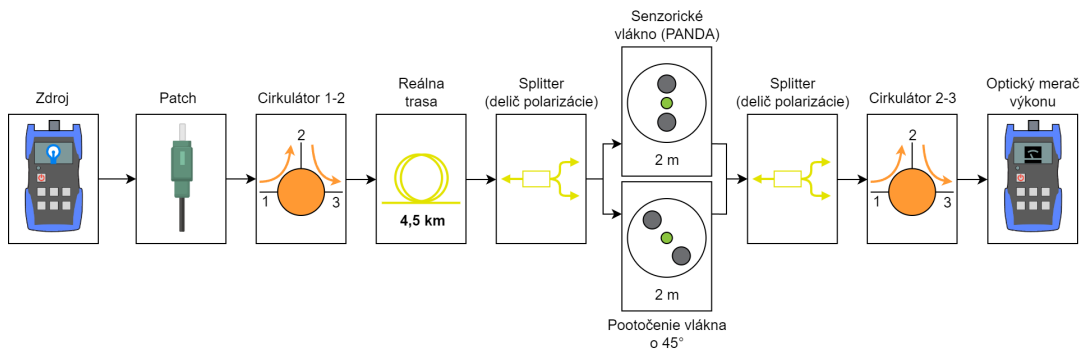
Popis udalostí na trase:

- Prvý konektor (Udalosť 1): Nachádza sa na začiatku meranej trasy.
 - Neodrazivý úsek (Udalosť 2): Vo vzdialenosti 0,15 km s útlumom 1,087 dB a odrazivosťou 1,596 dB, čo môže poukazovať na slabé spoje alebo malé nepravidelnosti.
 - Neodrazivý úsek (Udalosť 3): Nachádza sa na 0,30 km s útlumom 0,897 dB a celkovým kumulatívnym útlumom 2,715 dB, naznačujúce ďalšie možné slabé spoje alebo nepravidelnosti vo vlákne.
 - Odrazivý úsek (Udalosť 4): Odraz na 1,59 km s útlumom 0,970 dB a odrazivosťou $-53,8$ dB, čo môže indikovať spoj alebo defekt.
 - Odrazivý úsek (Udalosť 5): Vzdialenosť 2,22 km s útlumom 0,408 dB a odrazivosťou $-30,9$ dB, odraz je z Masarykovej univerzity a je pravdepodobne kvôli plochým konektorom.
 - Odrazivý úsek (Udalosť 6): Nachádza sa na 2,84 km s veľmi vysokou odrazivosťou $-70,8$ dB a minimálnym útlumom 0,105 dB. Toto môže byť ozvena alebo výrazný odraz.
 - Neodrazivý úsek (Udalosť 7): Udalosť vo vzdialenosti 4,13 km s útlumom 0,779 dB a celkovým kumulatívnym útlumom 6,024 dB, naznačujúce ďalšie slabé spoje alebo nepravidelnosti.
 - Neodrazivý úsek (Udalosť 8): Vo vzdialenosti 4,25 km s útlumom 0,218 dB a kumulatívnym útlumom 6,263 dB, možno naznačujúce drobné nepravidelnosti alebo spoje.
 - Neodrazivý úsek (Udalosť 9): Vo vzdialenosti 4,30 km s útlumom 0,155 dB a celkovým kumulatívnym útlumom 6,419 dB.
 - Odrazivý úsek (Udalosť 10): Koniec meraného úseku na 4,43 km s odrazivosťou $-46,0$ dB, čo môže značiť koniec vlákna alebo odraz na konci meraného úseku.
- Schéma zapojenia pri meraní reálnej trasy je zobrazená na obr. 6.74. Meranie bolo

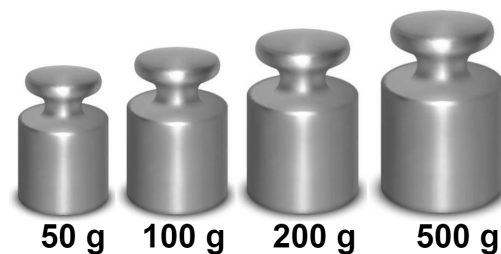
realizované na reálnej trase o dĺžke 4,5 km, pre lepšie pochopenie tohto merania reálnej trasy bol vytvorený obr. 6.75 ktorý zobrazuje postupnosť tejto trasy, od začiatku až po koniec. Meranie bolo uskutočnené pre rôzne typy závaží ako možno vidieť na obr. 6.76. Teplota v miestnosti kde prebiehalo meranie bola 24°C .



Obr. 6.74: Schéma zapojenia merania na reálnej trase



Obr. 6.75: Zobrazenie postupnosti pre 4,5 km reálnu trasu

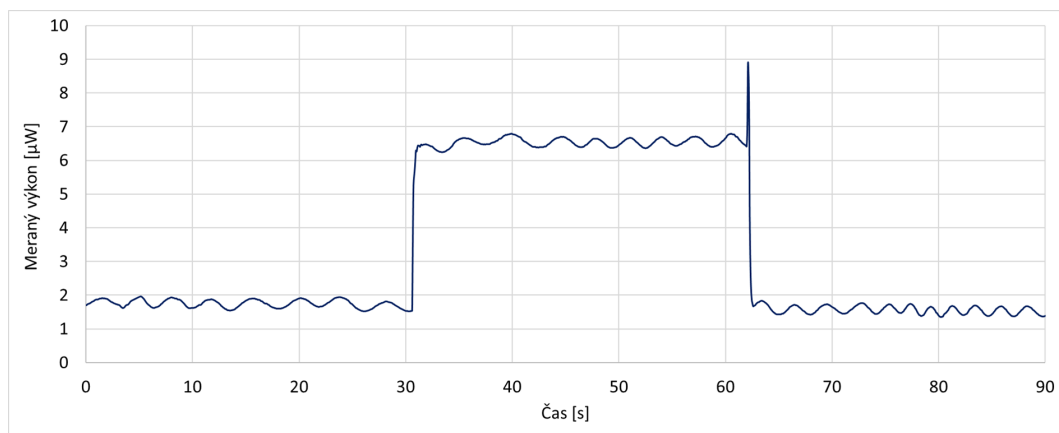


Obr. 6.76: Znázornenie rôznych typov závaží pre 4,5 km reálnu trasu

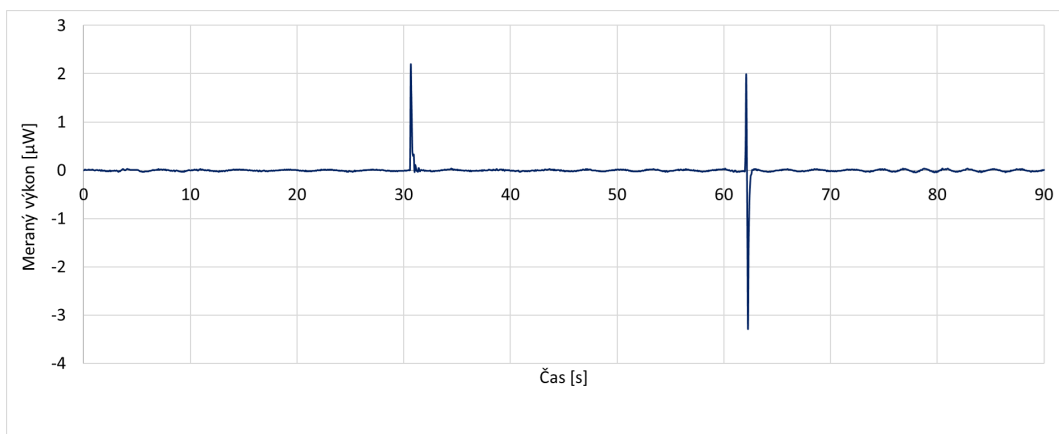
1. meranie – 4,5 km reálna trasa a 50 g závažie

Prvé meranie na reálnej trase o dĺžke 4,5 km bolo realizované pre 50 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polozenia a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenie závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

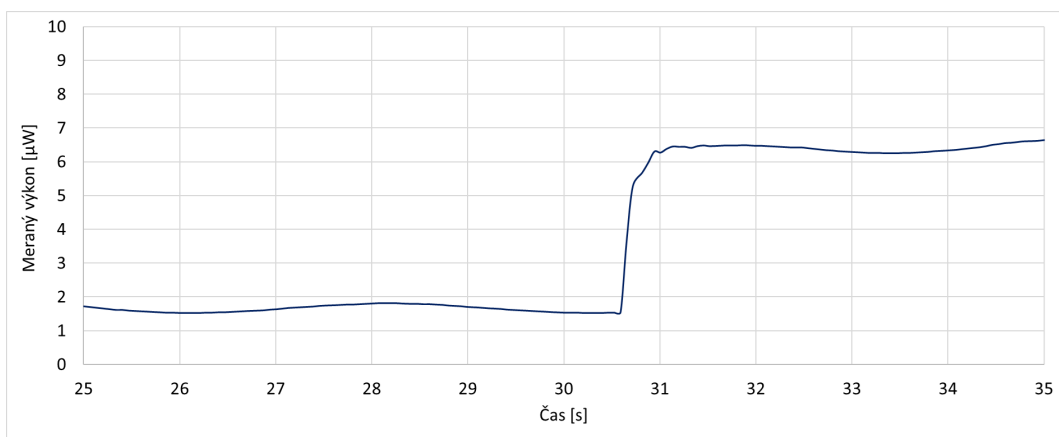
Na obr. 6.77 je pomocou grafu zobrazené celé meranie od 0 po 90 s. Os x zobrazuje časové hodnoty a na osi y sú hodnoty meraného výkonu. Možno si povšimnúť že výkon je relatívne stabilný. V približne 30 s dochádza k významnému nárastu výkonu, tento nárast naznačuje že bolo položené 50 g závažie na silikónový valec, na tomto silikónovom valci je navinuté senzorické vlákno. Po priložení závažia výkon zostáva výrazne vyšší približne do 60 s, kedy dochádza najskôr k nárastu výkonu a následne k poklesu výkonu, čo spôsobuje odobranie tohto 50 g závažia. Následne výkon zostáva relatívne stabilný a má približne rovnaké hodnoty tak ako na začiatku merania. Nasledujúci obr. 6.78 zobrazuje graf, ktorý bol vytvorený ako zmena vo výkone a jasne na nom vidieť priloženie závažia v 30 s a jeho odobranie v 60 s. Na obr. 6.79 možno vidieť detailnejšie priloženie závažia a na obr. 6.80 možno vidieť detailnejšie odobranie závažia.



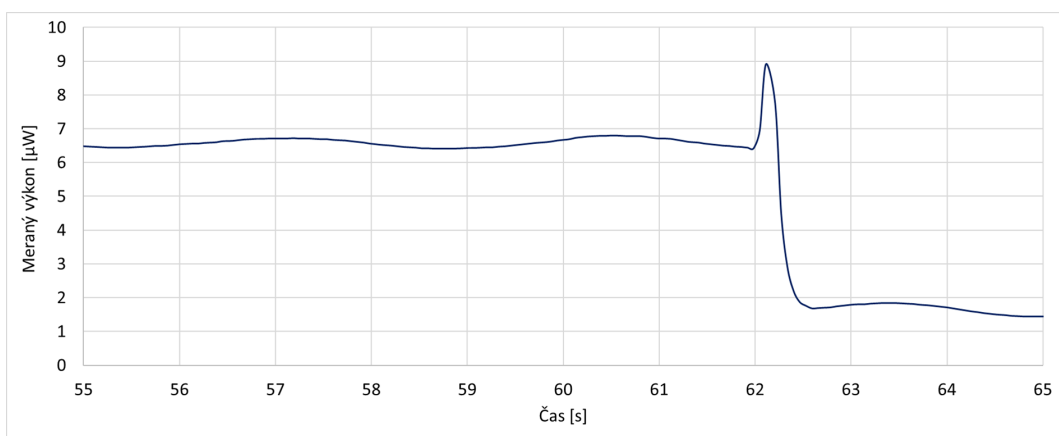
Obr. 6.77: Graf detekcie pri položení a odobratí 50 g závažia (4,5 km)



Obr. 6.78: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 50 g závažia (4,5 km)



Obr. 6.79: Graf polozenia 50 g závažia v 30 s (4,5 km)

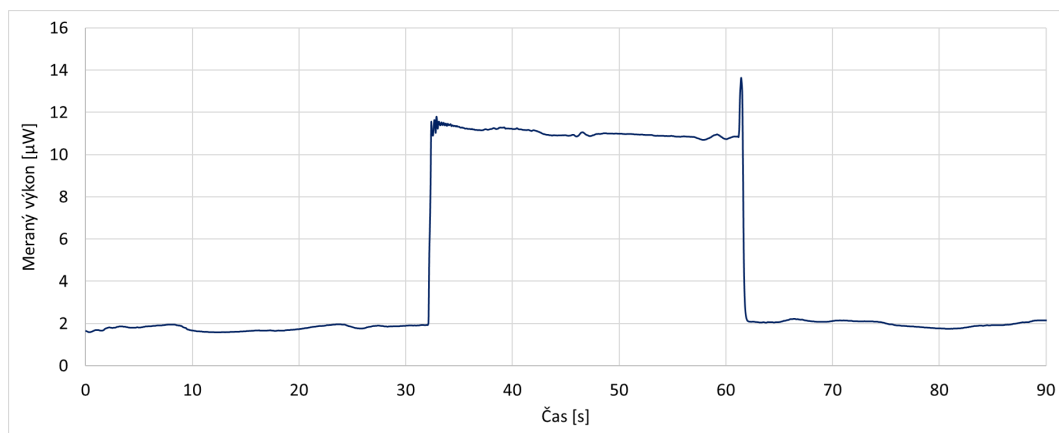


Obr. 6.80: Graf odobrania 50 g závažia v 60 s (4,5 km)

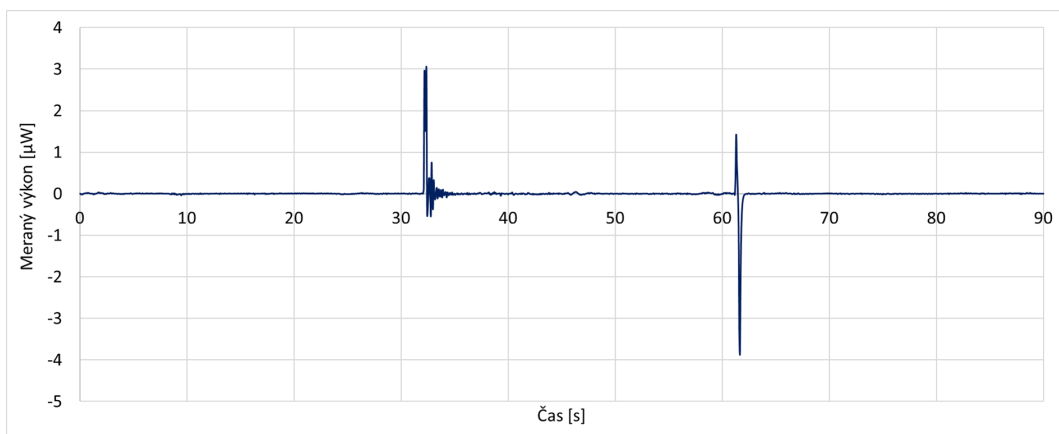
2. meranie – 4,5 km reálna trasa a 100 g závažie

Druhé meranie na reálnej trase o dĺžke 4,5 km bolo realizované pre 100 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polohy a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polohy závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

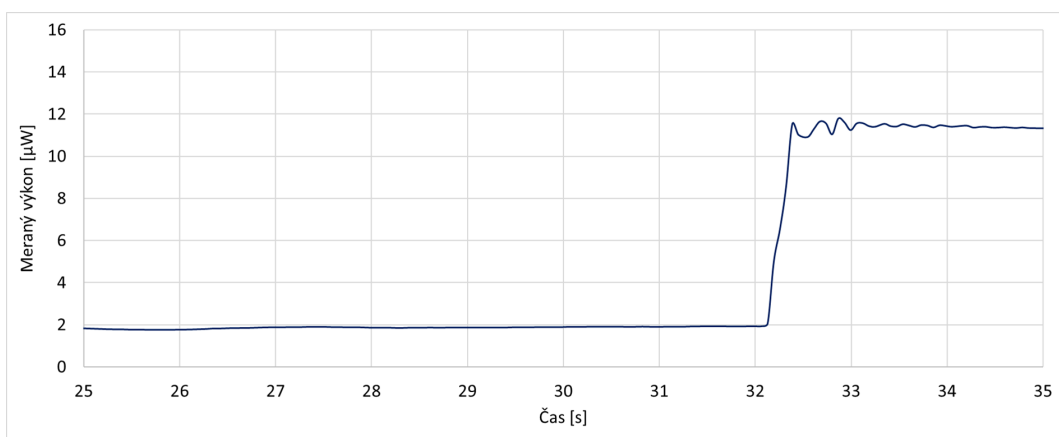
Na obr. 6.81 je pomocou grafu zobrazené celé meranie od 0 po 90 s. Os x zobrazuje časové hodnoty a na osi y sú hodnoty meraného výkonu. Možno si povšimnúť že výkon je relatívne stabilný. V približne 30 s dochádza k významnému nárastu výkonu, tento nárast naznačuje že bolo položené 100 g závažie na silikónový valec, na tomto silikónovom valci je navinuté senzorické vlákno. Po priložení závažia výkon zostáva výrazne vyšší približne do 60 s, kedy dochádza najskôr k nárastu výkonu a následne k poklesu výkonu, čo spôsobuje odobranie tohto 100 g závažia. Následne výkon zostáva relatívne stabilný a má približne rovnaké hodnoty tak ako na začiatku merania. Nasledujúci obr. 6.82 zobrazuje graf, ktorý bol vytvorený ako zmena vo výkone a jasne na nom vidieť priloženie závažia v 30 s a jeho odobranie v 60 s. Na obr. 6.83 možno vidieť detailnejšie priloženie závažia a na obr. 6.84 možno vidieť detailnejšie odobranie závažia.



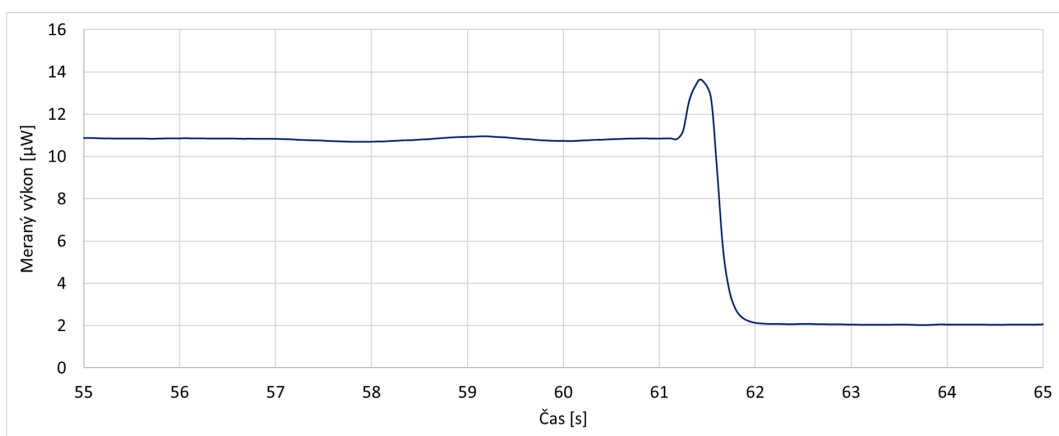
Obr. 6.81: Graf detekcie pri položení a odobratí 100 g závažia (4,5 km)



Obr. 6.82: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 100 g závažia (4,5 km)



Obr. 6.83: Graf polozenia 100 g závažia v 30 s (4,5 km)

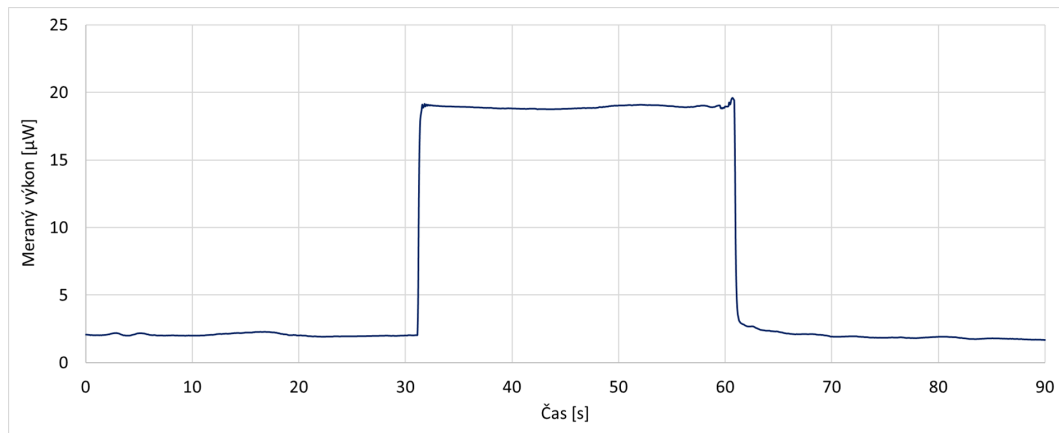


Obr. 6.84: Graf odobrania 100 g závažia v 60 s (4,5 km)

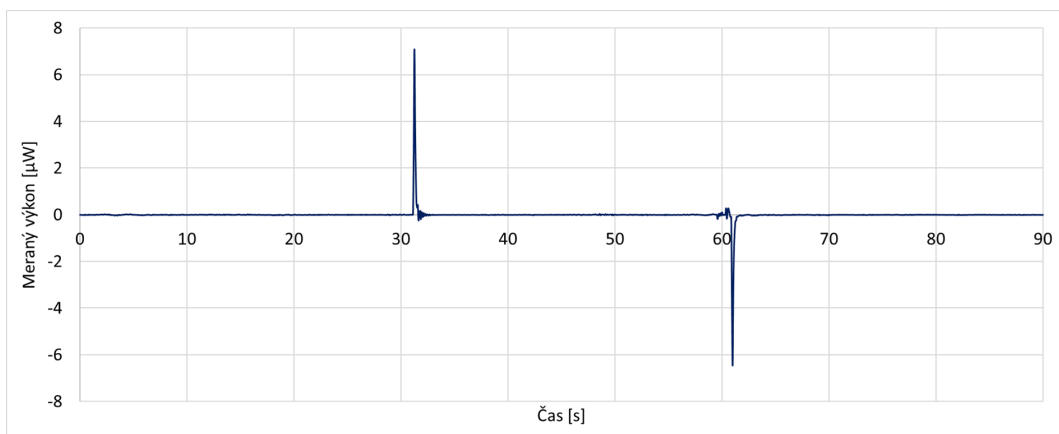
3. meranie – 4 km reálna trasa a 200 g závažie

Tretie meranie na reálnej trase o dĺžke 4,5 km bolo realizované pre 200 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polohy a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenie závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

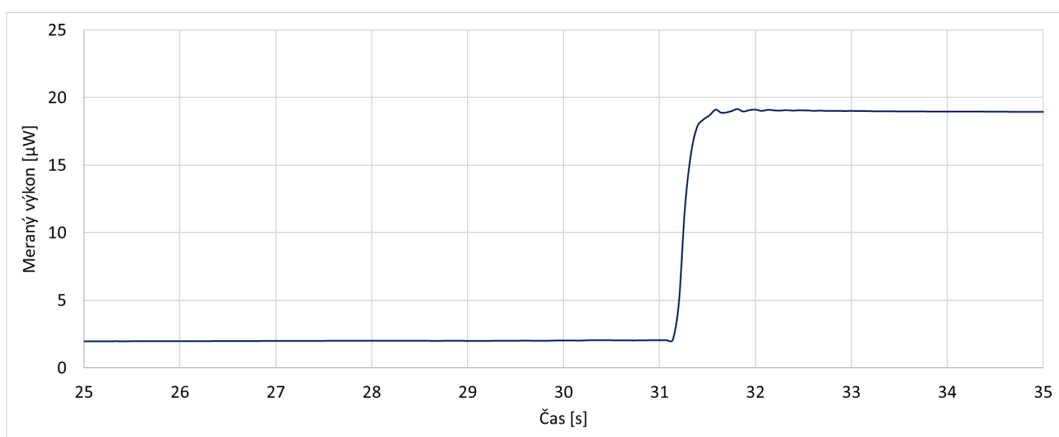
Na obr. 6.85 je pomocou grafu zobrazené celé meranie od 0 po 90 s. Os x zobrazuje časové hodnoty a na osi y sú hodnoty meraného výkonu. Možno si povšimnúť že výkon je relatívne stabilný. V približne 30 s dochádza k významnému nárastu výkonu, tento nárast naznačuje že bolo položené 200 g závažie na silikónový valec, na tomto silikónovom valci je navinuté senzorické vlákno. Po priložení závažia výkon zostáva výrazne vyšší približne do 60 s, kedy dochádza k poklesu výkonu, čo spôsobuje odobranie tohto 200 g závažia. Následne výkon zostáva relatívne stabilný a má približne rovnaké hodnoty tak ako na začiatku merania. Nasledujúci obr. 6.86 zobrazuje graf, ktorý bol vytvorený ako zmena vo výkone a jasne na nom vidieť priloženie závažia v 30 s a jeho odobranie v 60 s. Na obr. 6.87 možno vidieť detailnejšie priloženie závažia a na obr. 6.88 možno vidieť detailnejšie odobranie závažia.



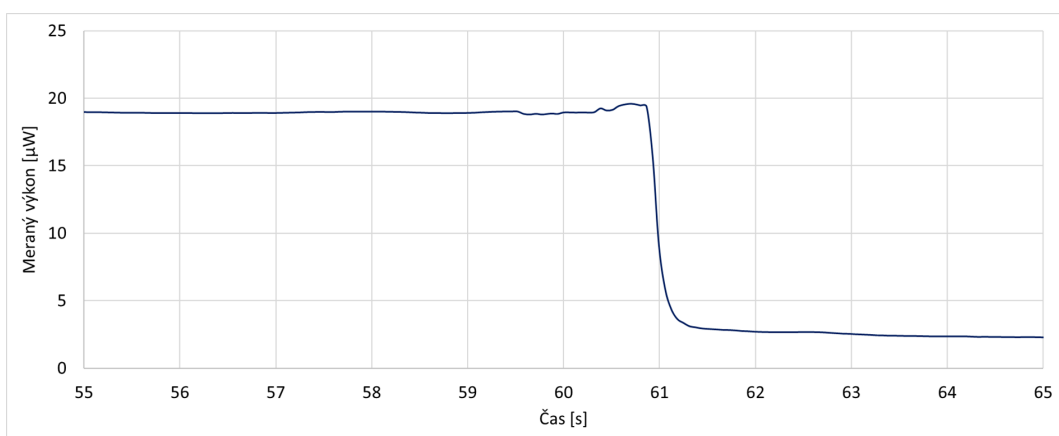
Obr. 6.85: Graf detekcie pri položení a odobratí 200 g závažia (4,5 km)



Obr. 6.86: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 200 g závažia (4,5 km)



Obr. 6.87: Graf polozenia 200 g závažia v 30 s (4,5 km)

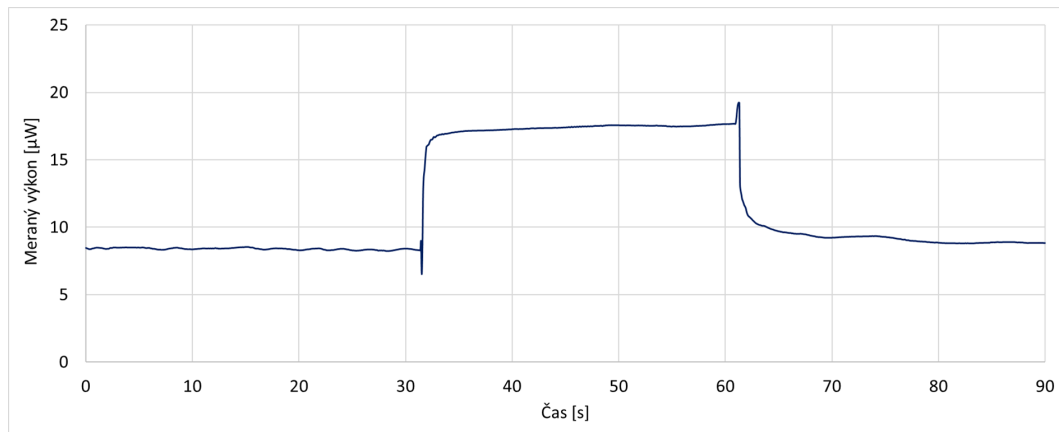


Obr. 6.88: Graf odobrania 200 g závažia v 60 s (4,5 km)

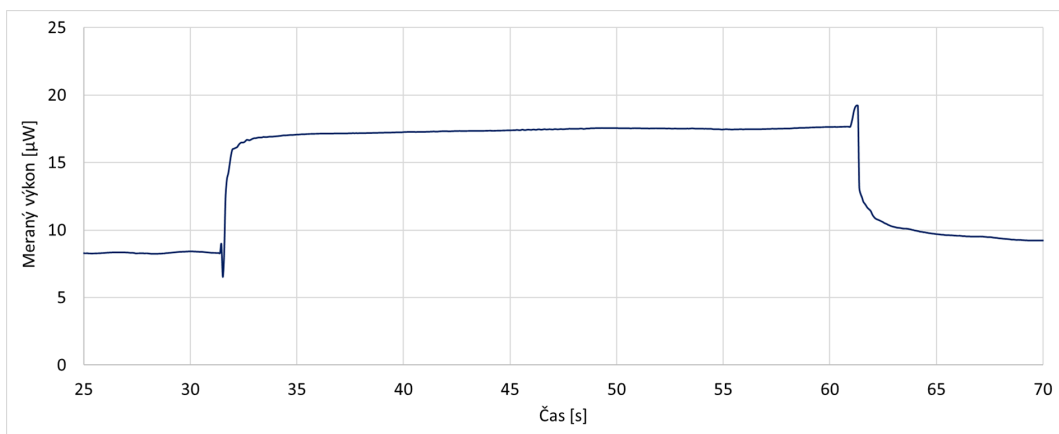
4. meranie – 4,5 km reálna trasa a 500 g závažie

Štvrté a zároveň posledné meranie na reálnej trase o dĺžke 4,5 km bolo realizované pre 500 g závažie. Celková dĺžka merania bola 90 s, začiatok merania je v 0 s. Závažie bolo položené na silikónový valec približne v 30 s a následne bolo odobrané približne v 60 s. Jedná sa o približné hodnoty polozenia a odobrania závažia nakoľko v tejto roli hrá ľudský faktor, kde nemožno garantovať úplne presné polozenie závažia v 30 s a odobranie závažia v 60 s. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafy.

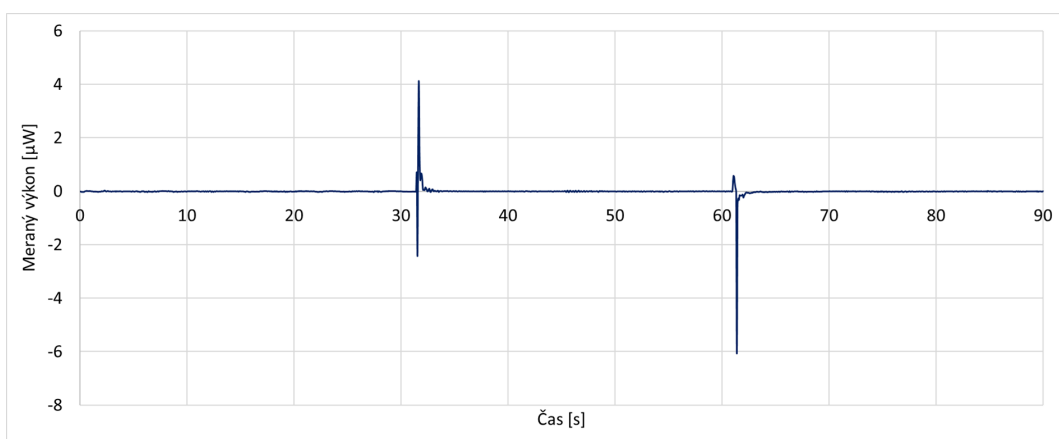
Na obr. 6.89 je pomocou grafu zobrazené celé meranie od 0 po 90 s. Os x zobrazuje časové hodnoty a na osi y sú hodnoty meraného výkonu. Možno si povšimnúť že výkon je relatívne stabilný. V približne 30 s dochádza k významnému nárastu výkonu, tento nárast naznačuje že bolo položené 500 g závažie na silikónový valec, na tomto silikónovom valci je navinuté senzorické vlákno. Po priložení závažia výkon zostáva výrazne vyšší približne do 60 s, kedy dochádza najskôr k nárastu výkonu a následne k poklesu výkonu, čo spôsobuje odobranie tohto 500 g závažia. Následne výkon zostáva relatívne stabilný a má približne podobné hodnoty tak ako na začiatku merania. Na obr. 6.90 je detailnejšie zobrazenie grafu, kde je zobrazená časová os od 25 do 70 s. Nasledujúci obr. 6.91 zobrazuje graf, ktorý bol vytvorený ako zmena vo výkone a jasne na nom vidieť priloženie závažia v 30 s a následne jeho odobranie v 60 s. Na obr. 6.92 možno vidieť detailnejšie priloženie závažia v približne 30 s a na obr. 6.93 možno vidieť detailnejšie odobranie závažia približne v 60 s. Posledné dva grafy, označené ako integračné, boli vytvorené z hodnôt zmeny vo výkone, ktoré boli následne určené ako absolútne číslo, z tejto hodnoty boli následne vytvorené. Graf na obr. 6.94 zobrazuje polozenie závažia a graf na obr. 6.95 zobrazuje odobranie závažia.



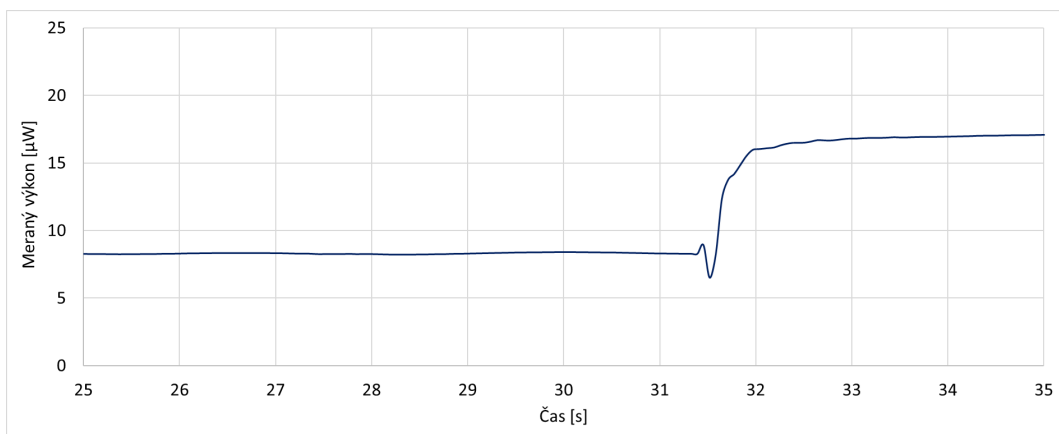
Obr. 6.89: Graf detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (4,5 km)



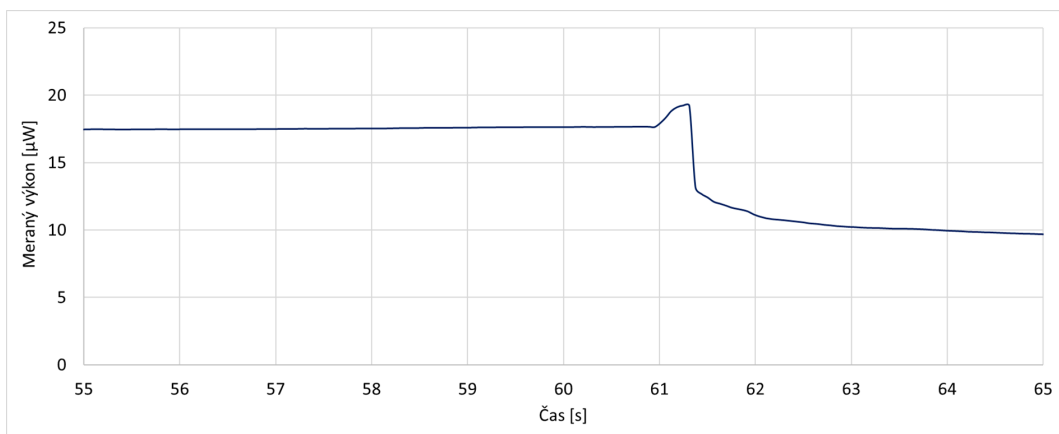
Obr. 6.90: Detailnejšie zobrazenie grafu detekcie pri položení a odobratí 500 g závažia (4,5 km)



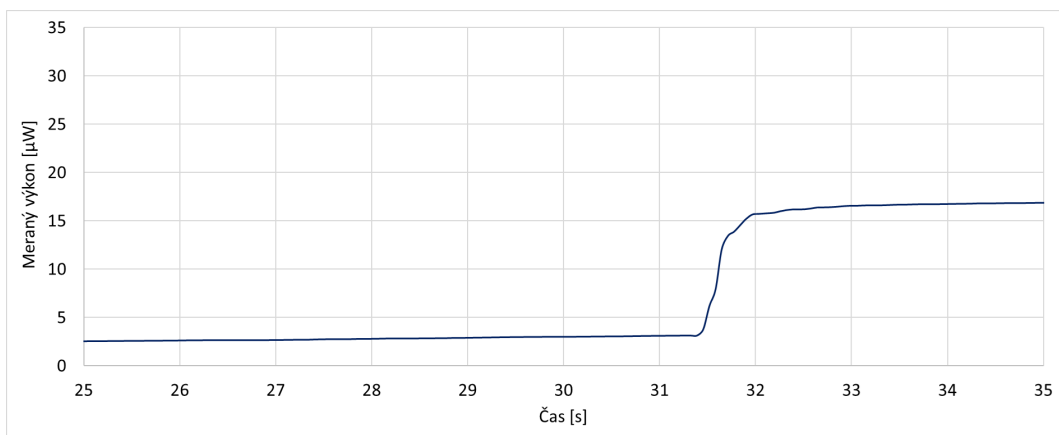
Obr. 6.91: Redundantný graf zmeny vo výkone pri položení 500 g závažia (4,5 km)



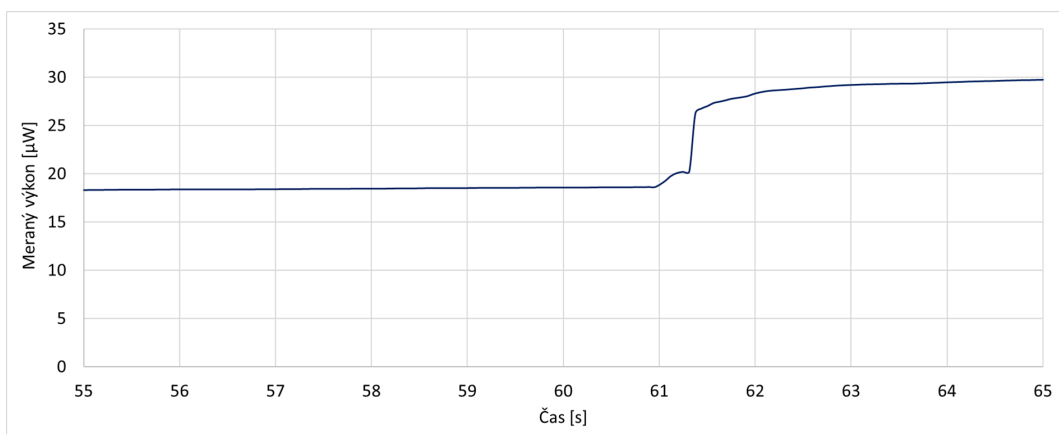
Obr. 6.92: Graf položení 500 g závažia v 30 s (4,5 km)



Obr. 6.93: Graf odobrania 500 g závažia v 60 s (4,5 km)



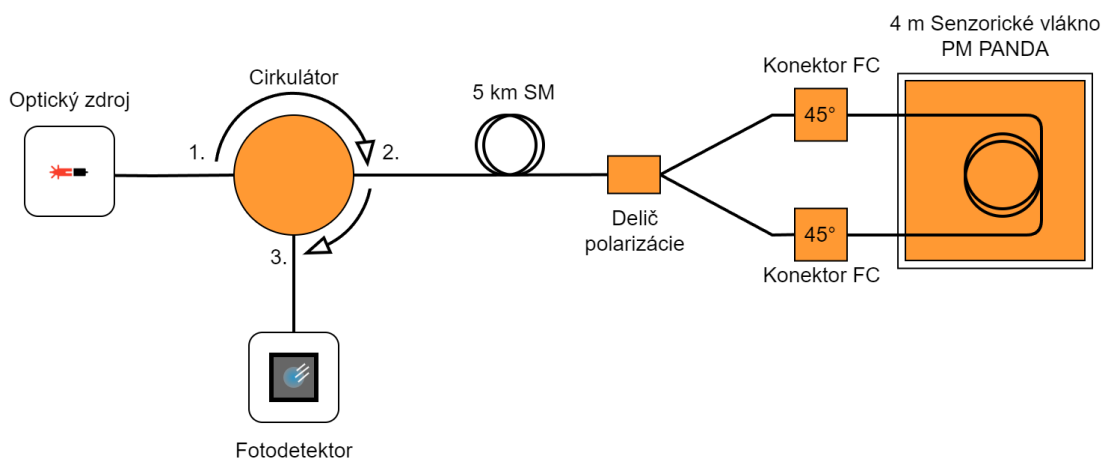
Obr. 6.94: Integračný graf pri položení 500 g závažia (4,5 km)



Obr. 6.95: Integračný graf pri odobraní 500 g závažia (4,5 km)

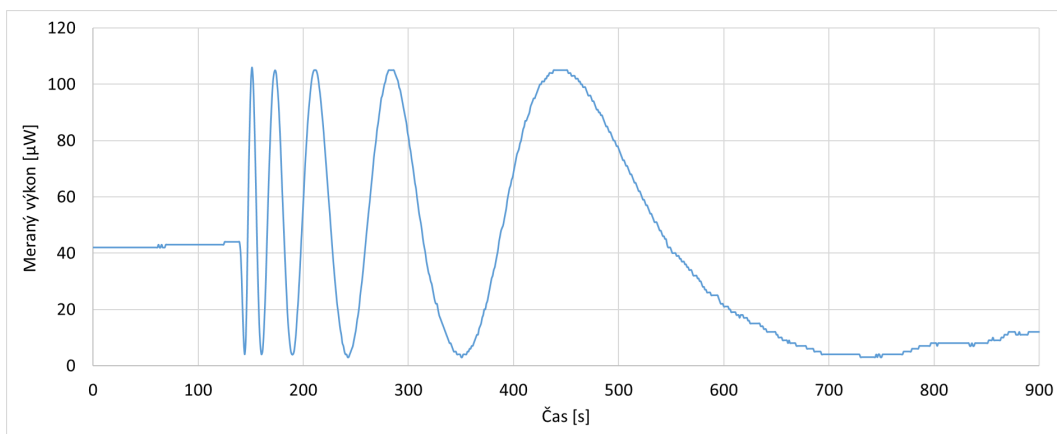
6.2 Detekcia teplotných zmien pomocou senzorického vlákna

Podľa schémy zapojenia na obr. 6.96 bolo zapojené meranie, ktoré slúži na detekciu teplotných zmien pomocou senzorického vlákna. Sensorické vlákno bolo uzatvorené v polystyrénovej krabičke kvôli okolnostiam, ktoré by mohli negatívne ovplyvniť meranie. S ohľadom na jeho citlivosť voči vonkajším vplyvom, ako je vlhkosť, teplota a mechanické poškodenie, bolo nevyhnutné zabezpečiť optimálne podmienky prostredníctvom krabičky s otvorom a rozmermi 10x10 cm. Celkovo 4 metre senzorického vlákna boli vložené do krabičky, vďaka ktorej bolo zabezpečené stabilné a spoľahlivé meranie. Počas priebehu merania došlo k priloženiu vody s ľadom o teplote 0°C k senzorickému vláknu v 140 s. Táto udalosť a ďalšie údaje z detekcie teplotnej zmeny sú zaznamenané v priložených grafoch. Tu možno vidieť náhle zmena vo výkone. Celková dĺžka merania bola 900 sekúnd a meranie prebiehalo za teploty miestnosti 24°C .

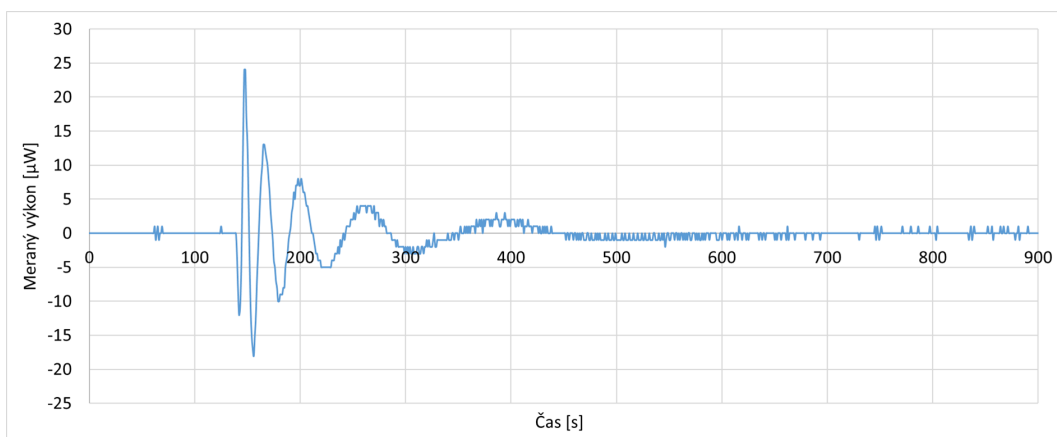


Obr. 6.96: Schéma zapojenia merania teplotných zmien pri 5 km trase

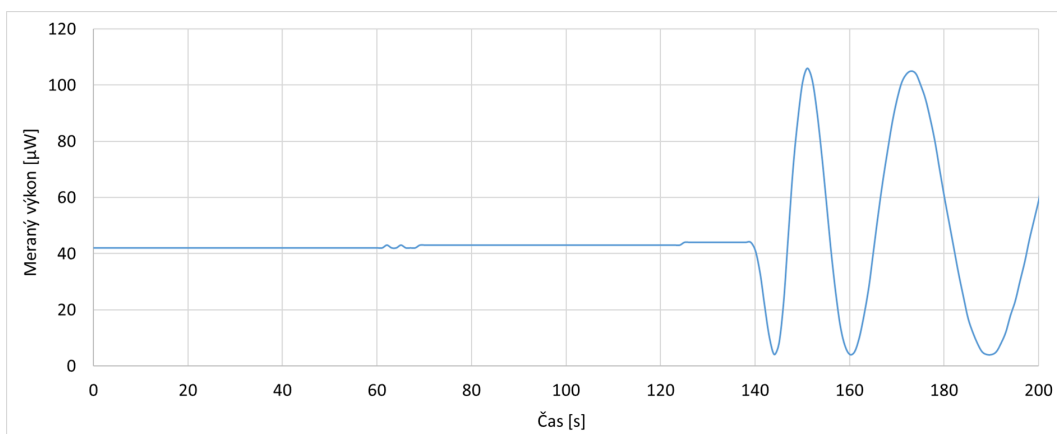
Na obr. 6.97 je prezentovaná celá trasa merania, zobrazujúca priebeh udalostí počas celkových 900 sekúnd merania. Zreteľne je na ňom zachytená aj udalosť v 140 s, keď bola priložená voda s ľadom. Nasledujúci obr. 6.98 zobrazuje graf, ktorý bol vytvorený ako zmena vo výkone a jasne na ňom vidieť v 140 s obdobie priloženia vody s ľadom. Ako posledný je obr. 6.99 jedná sa o graf zobrazujúci udalosti podrobnejšie. V tomto prípade časová os nie je rozšírená na 900 sekúnd, ale je obmedzená na 200 sekúnd, aby poskytla detailné zobrazenie udalostí počas obdobia, kedy bola v 140 s priložená voda s ľadom. Tento graf umožňuje podrobnejšie zobrazenie tejto udalosti.



Obr. 6.97: Graf detekcie pri priložení vody s ľadom o teplote 0°C (5 km)



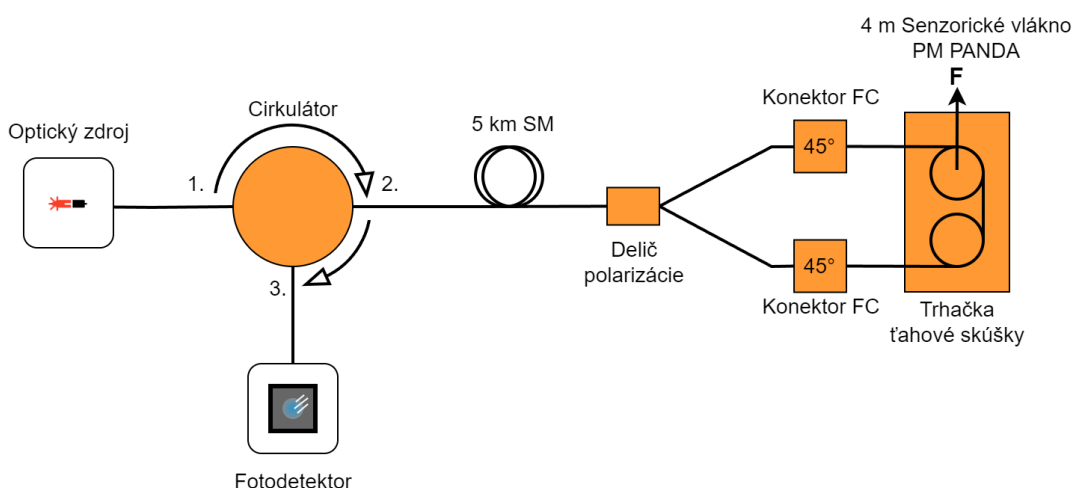
Obr. 6.98: Redundantný graf zmeny vo výkone pri priložení vody s ľadom o teplote 0°C (5 km)



Obr. 6.99: Detailné zobrazenie priloženia vody s ľadom o teplote 0°C (5 km)

6.3 Detekcia senzorického vlákna pomocou trhačky (proof tester) s cieľom overiť jeho detekčné schopnosti pri mechanickom namáhaní

Podľa schémy zapojenia na obr. 6.100 bolo zapojené meranie, ktorého zmyslom bolo overenie detekčných schopností pri mechanickom namáhaní senzorického vlákna, dĺžka trasy bola 5 km. Senzorické vlákno o dĺžke 4 m bolo natiahnuté na trhačku (proof tester), slúži na zistenie minimálnej pevnosti optického vlákna a odstránenie chýb, ktorých veľkosť závisí od použitého napätia počas testovania. Tento prístroj pravidelne, v intervaloch po 20 sekúnd, vyvíjal silný ťah s hodnotou 10 N (1. meranie) a 20 N (2. meranie) na vlákno, aby ho natiahol, a potom ho uvoľnil po ďalších 40 s. Celková dĺžka merania dosiahla 1200 sekúnd. Teplota v miestnosti zostala stabilná na úrovni 24°C. Takýto postup umožnil podrobnejšie sledovanie reakcie senzorického vlákna na opakované mechanické zaťaženie a uvoľňovanie.

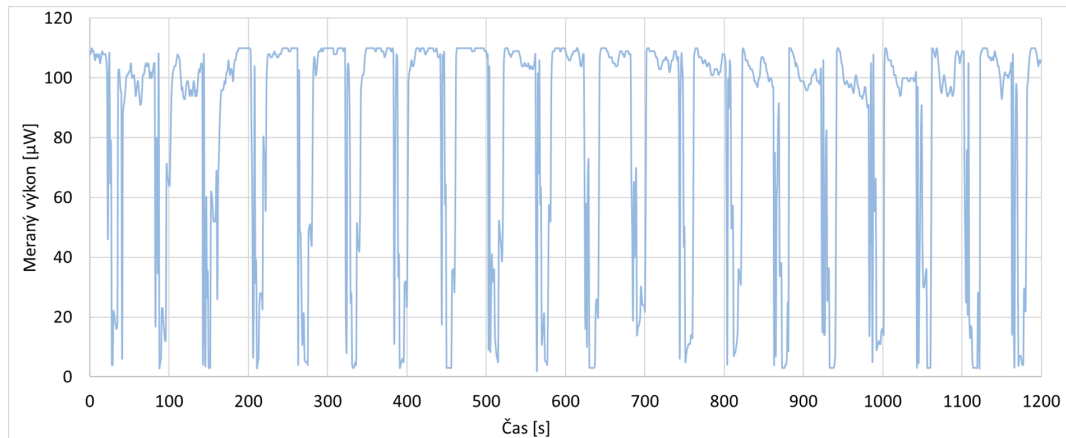


Obr. 6.100: Schéma zapojenia merania pomocou trhačky (proof tester)

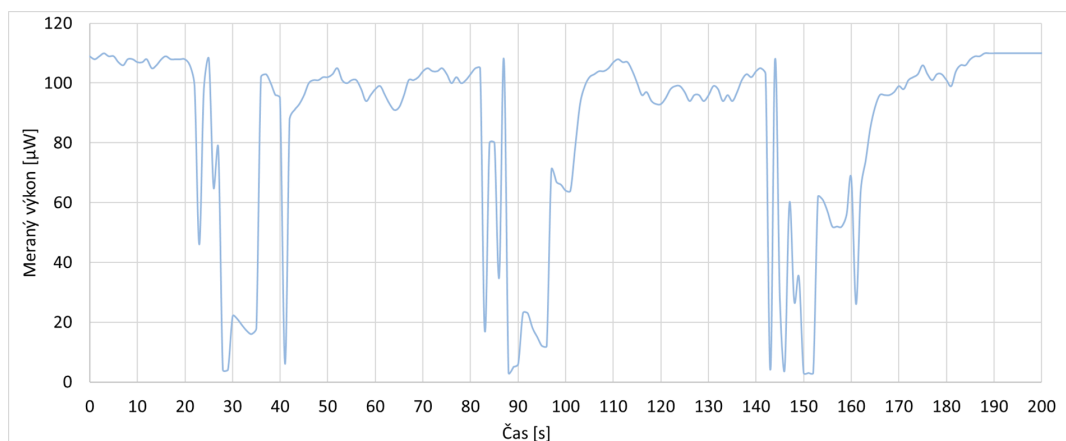
1. meranie – 5 km trasa s natiahnutým senzorickým vláknom pomocou trhačky (proof tester) o sile 10 N

Na prvom obr. 6.101 je zobrazený graf, ktorý zobrazuje celkové meranie trvajúce 1200 sekúnd. V tomto grafe sú viditeľné intervaly každých 20 sekúnd, kedy dochádza k natiahnutiu vlákna, a intervaly každých 40 sekúnd, kedy dochádza k jeho uvoľneniu. Druhý obr. 6.102 ukazuje podobné zobrazenie, avšak s časovým rozlíšením 200 sekúnd namiesto celkových 1200 sekúnd. Tento graf umožňuje podrobnejšie štúdium zmeny vo výkone vlákna v krátkom časovom úseku. Posledný obr. 6.103

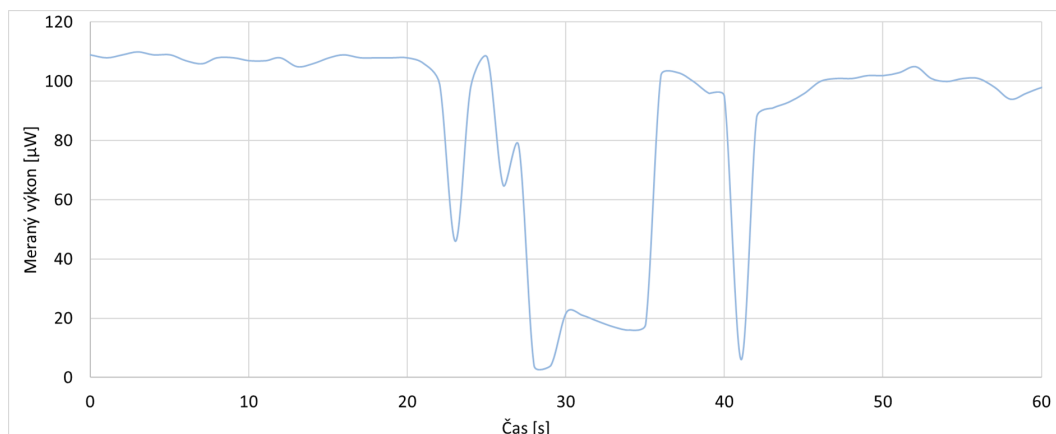
predstavuje detailné zobrazenie grafu, kde je časový rámec obmedzený na 60 sekúnd. V tomto grafe je zreteľne zobrazené natiahnutie v 20 s a uvoľnenie optického vlákna 40 s. Tento detailný pohľad umožňuje presnejšie pozorovanie detekcie vlákna v krátkom časovom úseku.



Obr. 6.101: Graf detekcie pri natiahnutí senzorickeho vlákna o sile 10 N (5 km)



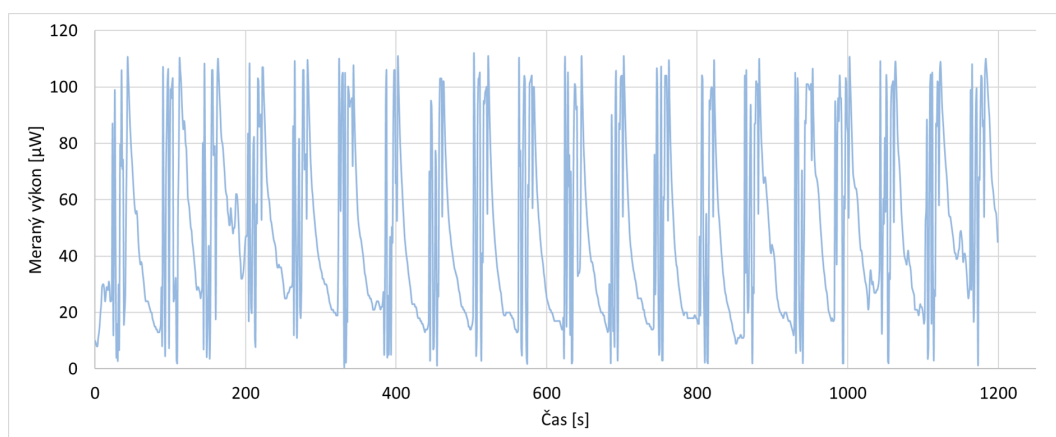
Obr. 6.102: Graf zobrazenia detekcie pri natiahnutí senzorickeho vlákna o sile 10 N (5 km)



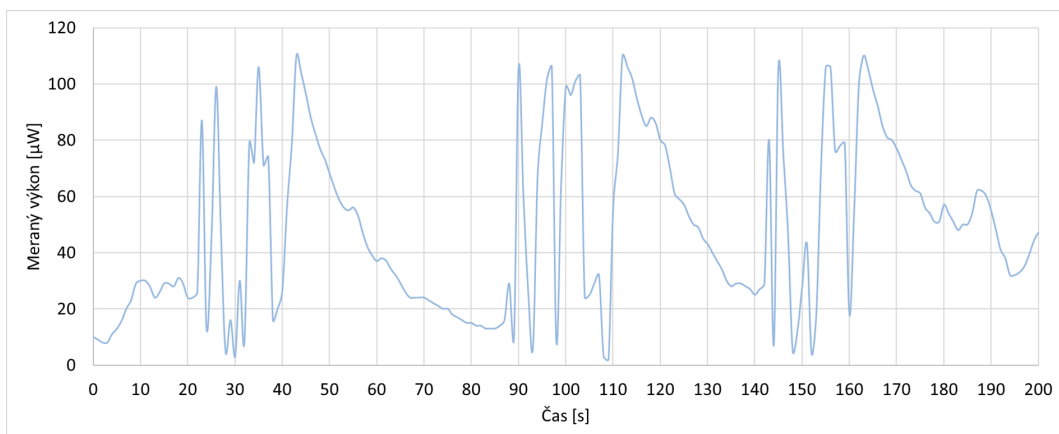
Obr. 6.103: Detailné zobrazenie detekcie pri natiahnutí senzorického vlákna o sile 10 N (5 km)

2. meranie – 5 km trasa s natiahnutým senzorickým vláknom pomocou trhačky (proof tester) o sile 20 N

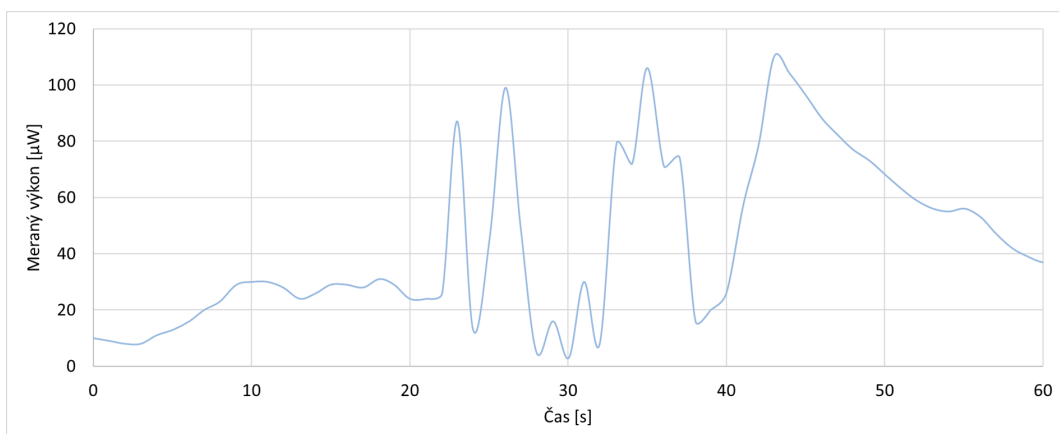
Na prvom obr. 6.104 je zobrazený graf, ktorý zobrazuje celkové meranie trvajúce 1200 sekúnd. V tomto grafe sú viditeľné intervaly každých 20 sekúnd, počas ktorých dochádza k natahovaniu vlákna a intervaly každých 40 sekúnd, kedy dochádza k jeho uvoľneniu. Druhý obr. 6.105 ukazuje podobné zobrazenie, avšak s časovým rozlíšením 200 sekúnd namiesto celkových 1200 sekúnd. Tento graf umožňuje podrobnejšie skúmanie zmien vo výkone vlákna v krátkom časovom úseku. Posledný obr. 6.106 predstavuje detailné zobrazenie grafu, kde je časový rámec obmedzený na 60 sekúnd. V tomto grafe možno vidieť natiahnutie vlákna v 20 s po dobu 20 sekúnd a jeho uvoľnenie v 40 s. Tento grafický pohľad umožňuje presnejšie sledovanie detekcie vlákna v krátkom časovom úseku.



Obr. 6.104: Graf detekcie pri natiahnutí senzorického vlákna o sile 20 N (5 km)



Obr. 6.105: Graf zobrazenia detekcie pri natiahnutí senzorickeho vlákna o sile 20 N (5 km)



Obr. 6.106: Detailné zobrazenie detekcie pri natiahnutí senzorickeho vlákna o sile 20 N (5 km)

7 Diskusia k meraniam a ich významu

7.1 Diskusia k meraniam

Merania uskutočnené v rámci tejto diplomovej práce otvárajú zaujímavé možnosti využitia v praxi, najmä v špeciálnych prostrediach, kde sú kladené vysoké nároky na spoľahlivosť a odolnosť senzorických systémov

Bol vykonaný test citlivosti senzorického vlákna, test bol vykonaný za účelom detekcie senzorického vlákna aj na menšie zmeny v prostredí, pomocou aplikácie rôznych záťaží. Jednalo sa o závažia 20g, 50g, 100g, 200g a 500g. Pri položení a odobraní týchto závaží bolo možné vidieť reakcie senzorického vlákna na tieto zmeny. Senzorické vlákno dokáže rýchlo a presne reagovať na zmeny v prostredí, čo je kľúčové pre jeho použitie v senzorických systémoch

Bola vykonaná aj vzdialená detekcia teplotných zmien ktorá je ďalším dôležitým aspektom, ktorý umožňuje monitorovať tepelné procesy s možnosťou prevencie prehriatia alebo ochladenia zariadení. Tieto informácie môžu byť kľúčové a najmä použiteľné pre prevádzkovú bezpečnosť a údržbu v rôznych odvetviach.

Bolo vykonané testovanie mechanickej odolnosti pomocou trhačky (proof tester) pri 10 N a 20 N umožnilo okamžite identifikovať a monitorovať akékoľvek zmeny v napätí na vlákne, čo umožňuje rýchlu reakciu a prevenciu možných poškodení alebo porúch senzorického systému.

Navrhnuté zapojenie má niekoľko výhod z ktorých jednou je schopnosť fungovať bez potreby elektrického napájania, čo predstavuje veľké výhody, nakoľko je možnosť použiť toto zapojenie v nebezpečných prostrediach, ako sú vojenské sklady, chemické závody a iné. Ďalšou výhodou je možnosť napájania tohto zapojenia na dlhé vzdialenosti. V mojom prípade som testoval senzor na trasách dlhých 1 km, 4,5 km, 50 km a 90 km, pri ktorých senzor stále spoľahlivo detegoval zmeny.

7.2 Návrh možného zapojenia pre nebezpečné prostredie (vojenský sklad)

Na obr. 7.1 je navrhnutá schéma zapojenia. Zapojenie je rozdelené na dve hlavné oblasti a to bezpečnú zónu (velín) a nebezpečnú zónu (vojenský sklad).

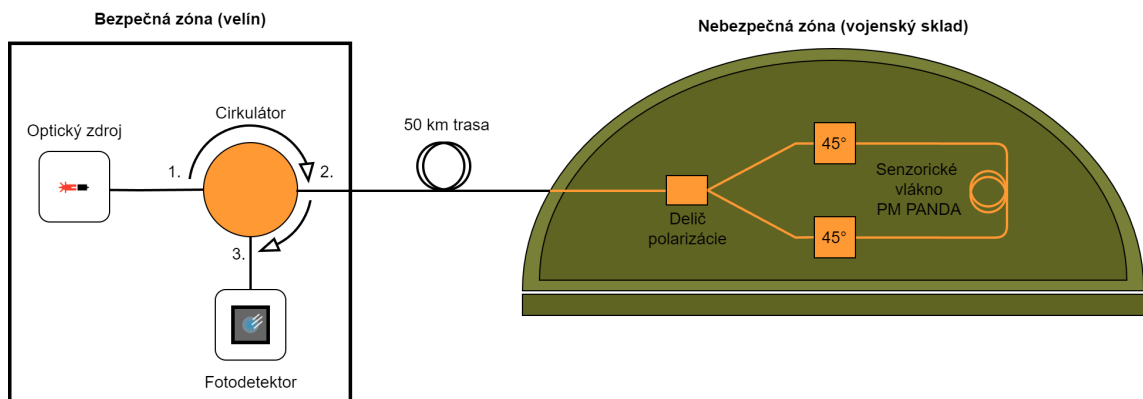
Bezpečná zóna (velín):

- Velín slúži pre označenie miestnosti odkiaľ sa obsluhujú a kontrolujú určité zariadenia alebo infraštruktúry.
- Optický zdroj nachádza sa v bezpečnej zóne a slúži pre generovanie svetelného signálu ktorý je nevyhnutný pre fungovanie optického systému.

- Cirkulátor smeruje svetelný signál do portu 2 kde trasa pokračuje a následne sa signál vráti späť cez port 3 do fotodetektoru.
- Fotodetektor sa nachádza na konci optickej trasy a je neoddeliteľnou súčasťou optických systémov. Slúži pre analyzovanie zmien v optickom signály.

Nebezpečná zóna (vojenský sklad):

- Delič polarizácie je zariadenie ktoré rozdelí vstupný signál na dva signály, jeden signál je v horizontálnej rovine a druhý signál je vo vertikálnej rovine.
- FC konektory pootočené o 45° konektory slúžia pre vyvolanie pomalej a rýchlej osi. Pomalá os je charakteristická tým že sa svetlo šíri pomalšie a to je dôsledkom vyššieho indexu lomu pre zložku polarizácie. U rýchlej osi je to presne naopak, čiže je charakteristická nižším indexom lomu a tak sa svetlo šíri rýchlejšie v zložke polarizácie.
- Sensorické vlákno typu PANDA je špeciálne navrhnuté vlákno pre vysokú citlivosť a spoľahlivosť v náročných podmienkach. Reaguje na rôzne zmeny v prostredí, čo bolo overené v praktickej časti.



Obr. 7.1: Navrhnutá schéma pre zapojenie v nebezpečnom prostredí (vojenský sklad)

Celkový popis zapojenia:

Zapojenie začína v bezpečnej zóne (velín) kde optický zdroj generuje svetelný signál, signál je ďalej smerovaný cez cirkulátor na porte 2 do optickej trasy o dĺžke 50 km, vlákno vedie do nebezpečnej zóny kde sa nachádza vojenský sklad. V nebezpečnej zóne prechádza signál cez delič polarizácie a následne cez dva FC konektory ktoré sú pootočené o 45° , jeden konektor vyvolá pomalú os a druhý rýchlu os. Nasleduje sensorické vlákno typu PANDA, ktoré slúži pre rôzne detekcie. Následne sa trasa vracia späť do bezpečnej zóny resp. do cirkulátora na porte 3 a nasleduje do fotodetektora. Trasa je navrhnutá tak aby zabezpečila vysokú spoľahlivosť na veľké vzdialenosti. Je bez potreby elektrického napájania, čiže v nebezpečnej zóne sa minimalizuje riziko zlyhaniu systému a ďalších iných vplyvov. Praktickou časťou

diplomovej práce bolo overené že toto zapojenie má vysoký potenciál a použiteľnosť práve do nebezpečných prostredí.

Záver

Diplomová práca začala výkladom základných princípov šírenia svetla ktoré sú potrebné pre pochopenie ďalších častí práce.

Nasledovala polarizácia ktorá opísala polarizáciu svetla, vrátane praktických poznatkov v optických senzoch. Detailne boli rozobraté polarizačné stavy svetla a ich reprezentácia pomocou Poincarého gule, Stokesových parametrov a Muellerovej matice.

V ďalších kapitolách boli predstavené rôzne typy optických komponentov a ich prínos pre vývoj v senzorických systémoch. Táto sekcia zahrnuje aj detailný popis polarizačných komponentov a rôznych typov senzorov ktoré sú využívané. Praktická časť práce mala za cieľ demonštrovať a navrhnúť schémy zapojenia spolu s popisom použitých zariadení a komponentov vo finálnej schéme ktorá bola vybraná na základe teoretických a praktických poznatkov. Predposledná kapitola prezentuje realizáciu meraní a výsledky meraní, kde bolo pracovisko zapojené podľa rôznych schém ktoré boli podrobené testovaniu.

Podrobný opis jednotlivých meraní a ich grafické zobrazenie ilustrujú detekciu senzorického vlákna pri aplikovaní závaží rôznej hmotnosti, ako aj detekciu teplotných zmien a následne testovanie mechanického namáhania pomocou trhačky (proof tester). Merania boli uskutočnené pre rôzne vzdialenosti a rôzne typy závaží. Meraniami bola overená vysoká presnosť a spoľahlivosť senzorov, taktiež bola overená funkčnosť schémy pre vzdialene napájanie, keďže zapojenia boli testované pre rôzne dĺžky optického vlákna ako 1 km, 50 km, 90 km a pre reálnu trasu o dĺžke 4,5 km.

Záverom možno skonštatovať že optovláknové senzory zachovávajúce polarizáciu sú obzvlášť vhodné pre použitie v prostrediach, kde nie je prístup k elektrickej energii, ako napríklad v armádnych alebo chemických skladoch. Ich unikátne vlastnosti umožňujú bezpečnú a spoľahlivú detekciu v prostrediach, kde by tradičné elektronické senzory mohli zlyhať alebo by ich použitie bolo nepraktické kvôli elektromagnetickému riziku alebo riziku výbušného prostredia. Diplomová práca potvrdila, že optovláknové senzory zachovávajúce polarizáciu predstavujú sľubnú technológiu pre monitoring a detekciu v špeciálnych prostrediach. Výsledky práce otvárajú cestu pre ďalší výskum a vývoj v tejto dynamicky sa rozvíjajúcej oblasti.

Literatúra

- [1] COLLETT, Edward. *Field Guide to Polarization*. 2005. SPIE Publications. ISBN 9780819478207.
- [2] HECHT, Eugene. *Optics 2017*. Pearson Education. ISBN 9780133977226. Online. Dostupné z:
<https://emineter.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/04/hecht-optics-5ed.pdf>.
- [3] SCHWARTZ, Matthew. *Polarization Online*. Dostupné z:
<https://scholar.harvard.edu/files/schwartz/files/lecture14-polarization.pdf>.
- [4] Cambridge University Press *Classical Optics and its Applications* 2011. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1017/CB09780511803796>.
- [5] THORLABS, INC. *Using the Poincare Sphere to Represent the Polarization State* Online. Dostupné z:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=14200.
- [6] BERRY, H. G., GABRIELSE, G., LIVINGSTON, A. E. *Measurement of the Stokes parameters of light. Applied optics* Online. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1364/AO.16.003200>.
- [7] THORLABS, INC. *The Polarization Ellipse Representation of the Polarization State* Online. Dostupné z:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=14199.
- [8] THORLABS, INC. *Polarization-Maintaining Fiber Optic Circulators* Online. Dostupné z:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3404.
- [9] Jia-Ming Liu *Photonic Devices* Cambridge University Press, 2005 Online. Dostupné z:
[https://library.navoiy-uni.uz/files/jia-ming%20liu%20-%20photonic%20devices%20\(2005\)\(1104s\).pdf](https://library.navoiy-uni.uz/files/jia-ming%20liu%20-%20photonic%20devices%20(2005)(1104s).pdf).
- [10] THORLABS, INC. *Fiber-Based Polarization Beam Combiner/Splitter, 3 PM Ports* Online. Dostupné z:
https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6786&pn=PBC1550PM-FC.

- [11] RAJAN, Ginu. *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications. 1st Edition*. CRC Press, 2015. ISBN 9781315215358.
- [12] KROHN, David; MACDOUGALL, Trevor a MENDEZ, Alexis. *Fiber optic sensors : fundamentals and applications*. 2014. Fourth edition. SPIE Press, 2014. ISBN 9781628411805.
- [13] CURRAN, Mark a SHIRK, Brian *Basics of Fiber Optics* Online. Dostupné z: <https://www.fibersystems.com/pdf/whitepapers/Basics-of-Fiber-Optics.pdf>.
- [14] ALGORITMI Research Centre, University of Minho *Optical Fiber Sensors and Sensing Networks* Sensors 2022, 22, 7554. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s22197554>.
- [15] YIN, Shizhuo; B. RUFFIN, Paul a T.S. YU, Francis. *Fiber Optic Sensors, Second Edition*. 2008. Second Edition. CRC Press, 2008. ISBN 9780367387563.
- [16] Feng Zhang and John W. Y. Lit *Temperature and strain sensitivity measurements of high-birefringent polarization-maintaining fibers*. 1993 Dostupné z: https://scholars.wlu.ca/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1023&context=phys_faculty.
- [17] Sang Min Jeon, Yong Pyung Kim *Temperature measurements using fiber optic polarization interferometer* 2004 Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399203001531>.
- [18] 4fibers. *OTDR Launch Cable. What is it?* Online. Dostupné z: <https://4fibers.eu/2020/01/21/otdr-launch-cable-what-is-it/>.
- [19] THORLABS, INC. *Polarization-Maintaining Single Mode Optical Fiber* Online. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1596.

Zoznam symbolov a skratiek

| | |
|--------------|--|
| ∇^2 | Laplace operator – Laplaceův operátor |
| A,B | Jones Matrix – Jonesovy Matice |
| c | Speed of light in vacuum – rýchlosť svetla vo vákuu |
| DOCP | Degree of circular polarization – stupeň kruhovej polarizácie |
| DOP | Degree of Polarization – stupeň polarizace |
| DOLP | Degree of linear polarization – stupeň lineárnej polarizácie |
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplexing – hustý vlnový multiplex |
| E | Electric field strength – vektor intenzity elektrického pole |
| FBG | Fiber Bragg grating – senzory s Braggovou mriežkou |
| J | Jones matrix – Jonesova matice |
| λ | Wavelength – vlnová dĺžka |
| M | Mueller matrix – Muellerova matice |
| n | Refractive index – index lomu |
| OTDR | Optical Time Domain Reflectometry – metóda spätného rozptylu |
| PANDA | Polarization Maintaining and Absorption Reducing – zachovávaajúce polarizáciu a redukuje absorbciu |
| PC | Polarization Controller – polarizačný kontrolér |
| PBC | Polarization Beam Combiner – delič polarizáciu v reverznom režime |
| PBS | Polarization Beam Splitter – polarizačný delič |
| PMD | Polarization Mode Dispersion — polarizačná vidová disperzia |
| PM | Polarization Maintaining – zachovanie polarizácie |
| PMF | Polarization Maintaining Fiber – vlákno zachovávaajúce polarizáciu |
| SM | single-mode – jednovidové |
| SMF | single-mode fiber – jednovidové optické vlákno |
| SOP | State of Polarization – stav polarizácie |