

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Jakub Vošček



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

OPTICKÉ VLÁKNO JAKO DISTRIBUOVANÝ TEPLOTNÍ SENZOR

OPTICAL FIBER AS A DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Vošček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2020



Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Jakub Vošček

ID: 164438

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Optické vlákno jako distribuovaný teplotní senzor

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je rozbor problematiky využití optického vlákna jako distribuovaného teplotního senzoru (systém DTS) a srovnání jednotlivých metod měření z pohledu hlavních parametrů (maximální dosah, přesnost, rozlišení, apod.). Na základě teoretického rozboru bude proveden návrh verifikačního měření parametrů systémů DTS. V rámci diplomové práce bude realizován vlastní jednoduchý DTS systém a budou vyhodnoceny jeho základní parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SANTOS, José Luis a Faramarz FARABI. Handbook of optical sensors. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor, 2015, pages cm. ISBN 978-143-9866-856.

[2] UDD, Eric a William B SPILLMAN. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2011, xiii, 498 p. ISBN 978-047-0126-844.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 11.8.2020

Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

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

Postupne sa vyrovnáva finančná náročnosť medzi optickými vláknovými senzormi a konvenčnými senzormi, ktorá spomaľovala dopyt po týchto senzoroch aj napriek početným výhodám a veľkému rozsahu použitiu. S dopytom po optických vláknových senzoroch rastú aj nároky na parametre týchto senzorov.

Táto práca sa zaoberá distribuovanými teplotnými optickými vláknovými senzormi. Pri meraní pomocou týchto senzorov sa väčšinou využívajú nelineárne javy v optických vláknach, ako napr. Ramanov rozptyl. Tento rozptyl bol použitý k získaniu informácií o teplote pôsobiacej na optický kábel.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Optické vlákno, Rayleighov rozptyl, Ramanov rozptyl, distribuovaný teplotný optický vláknový senzor, VIAVI DTS, OTDR, MATLAB

ABSTRACT

The financial requirements between fiber optic sensors and conventional sensors are gradually declining, which, despite many advantages and wide range of applications, has slowed down the demand for these sensors. With the demand for fiber optic sensors also grow the requirements for the parameters of these sensors.

This thesis deals with distributed temperature fiber optic sensors. Non-linear phenomena in optical fibers, such as Raman scattering is used for measuring with these sensors. This scattering was used to obtain information about temperature, which effected the optical cable under the test.

KEYWORDS

Optical fibre, Rayleigh scattering, Raman scattering, distributed temperature fiber optic sensor, VIAVI DTS, OTDR, MATLAB

VOŠČEK, Jakub. *Optické vlákno jako distribuovaný teplotní senzor*. Brno, Rok, 75 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „Optické vlákno jako distribuovaný tepelní senzor“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej 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 diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej 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

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Petrovi Münstrovi Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 10 |
| 1 Základy optických vlákien | 11 |
| 1.1 Delenie optických vlákien | 11 |
| 1.1.1 Jednovidové optické vlákna so skokovou zmenou indexu lomu . | 12 |
| 1.1.2 Mnohovidové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu | 12 |
| 1.1.3 Mnohovidové vlákna s plynulou zmenou indexu lomu | 12 |
| 1.2 Parametre optických vlákien | 13 |
| 1.2.1 Útlm optického vlákna | 13 |
| 1.2.2 Chromatická disperzia | 14 |
| 1.2.3 Numerická apertúra – NA | 14 |
| 1.2.4 Rayleighov rozptyl | 14 |
| 1.2.5 Ramanov rozptyl | 15 |
| 1.2.6 Brillouinov rozptyl | 15 |
| 2 Optické vláknové senzory - všeobecne | 17 |
| 2.1 História optických vláknových senzorov – OVS | 17 |
| 2.2 Princíp optických senzorov obecne | 17 |
| 2.3 Vlastnosti OVS | 18 |
| 2.4 Rozdelenie OVS | 19 |
| 2.4.1 Sensory založené na základe amplitúdy/intenzity | 19 |
| 2.4.2 Sensory založené na základe polarizácie | 21 |
| 2.4.3 Sensory založené na základe frekvencie | 22 |
| 2.4.4 Sensory založené na základe fázy | 22 |
| 2.5 Použitie | 23 |
| 3 Distribuované optické vláknové senzory | 25 |
| 3.1 Výkonostné parametre distribuovaných OVS | 26 |
| 3.2 Metódy merania teploty distribuovaných OVS | 27 |
| 3.2.1 C–OTDR s využitím Rayleighovho rozptylu | 27 |
| 3.2.2 OTDR s využitím Ramanovho rozptylu | 29 |
| 3.2.3 OTDR s využitím Brillouinovho rozptylu | 31 |
| 3.3 Parametre metód distribuovaných teplotných senzorov – DTS | 34 |
| 3.3.1 Porovnanie metód DTS | 34 |
| 3.3.2 Komerečne dostupné zariadenia | 35 |
| 3.3.3 Výskum a rozvoj DTS | 38 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | VIAVI Solutions | 40 |
| 4.1 | VIAVI MTS 6000A | 40 |
| 5 | Meranie s VIAVI MTS 6000A | 43 |
| 5.1 | Referenčné meranie v laboratórnych podmienkach s teplotnou komorou | 45 |
| 5.2 | Zisťovanie vzdialenosti referenčných bodov zapojenia použitím DTS . | 48 |
| 5.3 | Meranie simulovaného úniku medzi plášťami potrubia | 50 |
| 5.4 | Meranie simulovaného úniku z vonkajšieho plášťa | 56 |
| 5.5 | Priebehové meranie simulovaného úniku medzi plášťami | 59 |
| 6 | Meranie pomocou klasického OTDR | 61 |
| 6.1 | Meranie pri umiestnení 10 cm kábla do teplotnej komory | 62 |
| 6.2 | Meranie pri umiestnení 1 m kábla do teplotnej komory | 64 |
| | Záver | 69 |
| | Literatúra | 71 |
| | Zoznam symbolov, veličín a skratiek | 75 |

Zoznam obrázkov

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Princíp optických vlákien | 11 |
| 1.2 | Jednovidové vlákno | 12 |
| 1.3 | Mnohovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu | 13 |
| 1.4 | Mnohovidové vlákno s plynulou zmenou indexu lomu | 13 |
| 2.1 | Obečná bloková schéma OVS | 17 |
| 2.2 | Senzor založený na evanescentných vlnách | 20 |
| 2.3 | Princíp konštrukcie polarizačných OVS | 21 |
| 2.4 | Schematický diagram a) Michelsonovho a b) Mach-Zehnderovho interferometra | 23 |
| 3.1 | Distribúované optické senzory | 25 |
| 3.2 | C-OTDR | 28 |
| 3.3 | Princíp OTDR založený na Ramanovom rozptyle | 30 |
| 3.4 | Intenzita anti-Stokesovej zložky | 31 |
| 3.5 | Princíp BOTDR | 33 |
| 3.6 | Princíp BOTDA | 34 |
| 3.7 | Rozptyly v optickom vlákne | 35 |
| 4.1 | VIAVI MTS 6000a | 40 |
| 4.2 | VIAVI MTS 6000a hlavné menu | 41 |
| 4.3 | VIAVI MTS 6000a nastavenie parametrov | 42 |
| 5.1 | Schéma zapojenia (Teplotná komora) | 45 |
| 5.2 | Nádoba s vodou | 46 |
| 5.3 | Meranie OTDR zapojenia s teplotnou komorou | 47 |
| 5.4 | Meranie pri umiestnených 10 cm kábla v teplotnej komore | 48 |
| 5.5 | Meranie pri umiestnených 1 m kábla v teplotnej komore | 49 |
| 5.6 | Meranie pre rôzne priestorové rozlíšenie pri teplote 37,2 °C | 50 |
| 5.7 | Realizácia zapojenia (centrum AdMaS) | 51 |
| 5.8 | Nákres zapojenia (centrum AdMaS) | 51 |
| 5.9 | Meranie pomocou teplovzdušnej pištole | 52 |
| 5.10 | Schéma s vyznačenými referenčnými bodmi | 53 |
| 5.11 | Simulovaný únik medzi plášťami potrubia | 53 |
| 5.12 | Simulovaný únik medzi plášťami potrubia s prietokom 280 ml za sekundu | 54 |
| 5.13 | Simulovaný únik medzi plášťami potrubia s prietokom 400 ml za sekundu | 55 |
| 5.14 | Simulovaný únik medzi plášťami potrubia s prietokom 550 ml za sekundu | 56 |
| 5.15 | Schéma s vyznačenými referenčnými bodmi | 57 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.16 | Simulovaný únik z vonkajšieho pláštá s prietokom 140 ml za sekundu | 58 |
| 5.17 | Simulovaný únik z vonkajšieho pláštá s prietokom 360 ml za sekundu | 58 |
| 5.18 | Priebehové meranie simulovaného úniku medzi pláštami | 59 |
| 5.19 | Priebehové meranie simulovaného úniku medzi pláštami | 60 |
| 6.1 | Schéma zapojenia merania s OTDR | 61 |
| 6.2 | Reálne zapojenie merania s OTDR | 62 |
| 6.3 | Meranie s Atomo wave SOT-A80 pri 10 cm kábľa v teplotnej komore | 63 |
| 6.4 | Meranie s Exfo FTB-1 pri 10 cm kábľa v teplotnej komore | 64 |
| 6.5 | Meranie s Atomo wave SOT-A80 pri 1 m kábľa v teplotnej komore . . | 65 |
| 6.6 | Meranie s Atomo wave SOT-A80 pri 1 m kábľa v teplotnej komore bez kompenzácie | 66 |
| 6.7 | Meranie s Exfo FTB-1 pri 1 m kábľa v teplotnej komore bez kompen- zácie | 67 |
| 6.8 | Meranie s Exfo FTB-1 pri 1 m kábľa v teplotnej komore | 68 |

Úvod

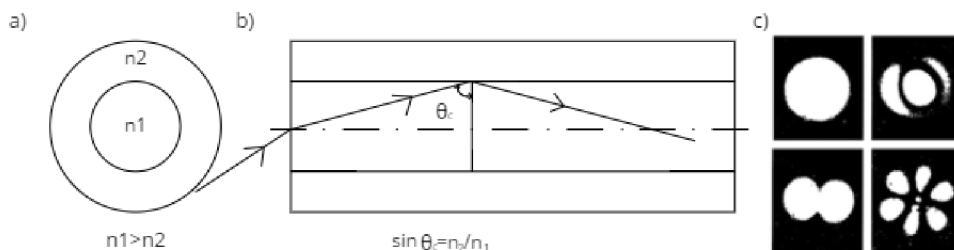
V prvej časti práce je rozobratá teória optických vlákien, to znamená zloženie optického vlákna a šírenie sa svetla optickým vláknom. Ďalej je popísané delenie optických vlákien a parametre optických vlákien. Medzi parametrami optických vlákien sú rozobraté 3 rozptyly (Reyleighov, Ramanov a Brillouinov rozptyl), ku ktorým dochádza v optických vláknach, a ktoré sa využívajú pri optických vláknových senzoch. Ďalšia kapitola sa venuje samotným optickým vláknovým senzom, ich princípu fungovania, vlastnostiam, rozdeleniu a použitiu. Následne sú popísané distribuované optické vláknové senzory, kde sú popísané parametre, ktoré sú pre ne dôležité. Práca sa zaoberá teplotným optickým vláknovým senzom a teda sú popísané 3 základné metódy merania teploty. Každá metóda využíva iný rozptyl, ku ktorému dochádza v optickom vlákne.

V druhej časti práce sú uskutočnené merania pomocou meracieho prístroja VIAVI MTS 6000A od technologickej spoločnosti VIAVI. Pomocou tohto zariadenia bolo uskutočnené meranie v laboratórnych podmienkach, kde sa snímala teplota pomocou testovaného vlákna umiestneného v teplotnej komore. Pri tomto zapojení išlo o umiestnenie rôznej dĺžky kábla do teplotnej komory (10 cm a 1 m). Pri ďalších meraniach išlo o meranie zmeny teploty pri simulácii úniku dvojplášťového odpadového potrubia. Meranie bolo realizované pri simulácii úniku medzi plášte potrubia a následne aj meranie simulovaného úniku do pôdy. Posledným meraním bolo priebehové meranie počas 18 hodín, ktoré bolo realizované každých 20 minút. Toto meranie bolo vykonané pri simulácii úniku medzi plášťami potrubia. Merania boli vyhodnotené a vizualizované v programe MATLAB.

V tretej časti prebehlo meranie pomocou klasického OTDR v laboratórnych podmienkach, kde bola opäť použitá teplotná komora. Pri týchto meraniach boli použité dva prístroje Atomo wave SOT-A80 a Exfo FTB-1. Bolo zostavené vlastné zapojenie, kde bol použitý EDFA zosilňovač, optické cirkulátory a optický filter, ktorým bola filtrovaná vlnová dĺžka 1450 nm odpovedajúca anti-Stokesovej zložke. Výsledky boli opäť spracované v program MATLAB.

1 Základy optických vláken

Pri optických vláknových senzoroach OVS sa používajú optické vlákna. Svetlo sa šíri vláknom pomocou série odrazov od strán vlákna. Optické vlákno sa skladá z jadra s indexom lomu n_1 a obalu s indexom lomu n_2 ako je zobrazené na obrázku 1.1a). Rozdielny index lomu n_1 a n_2 zapríčiniť, že existuje uhol θ_C pri ktorom dochádza k úplnému odrazu svetelného lúča na rozhraní jadro/obal. Všetky lúče, ktoré dopadnú pod uhlom väčším ako θ_C budú vedené pozdĺž vlákna.



Obr. 1.1: Princíp optických vláken: a) priečny prierez vlákna b) totálny odraz na rozhraní medzi jadrom – obalom c) ilustrácia rôznych vidov šírenia sa žiarenia vláknom[2]

Rozmery vlákna sú porovnateľné s očakávanými rozpoznateľnými interferenčnými obrazcami, ktoré sa vytvoria v jadre vlákna, pretože mnoho svetelných vln vzájomne interaguje. Takéto interferenčné vzorce sú zobrazené na obrázku 1.1c). Tieto vzorce závisia od geometrických rozmerov vlákna a vlnovej dĺžke použitého svetla. To znamená, že budú závisieť od podmienok prvotného naviazania svetelného lúča a od geometrických alebo iných rušení. Pri interakcii medzi dvoma vidmi dochádza aj ku zmene polarizácie týchto vidov. [1]

1.1 Delenie optických vláken

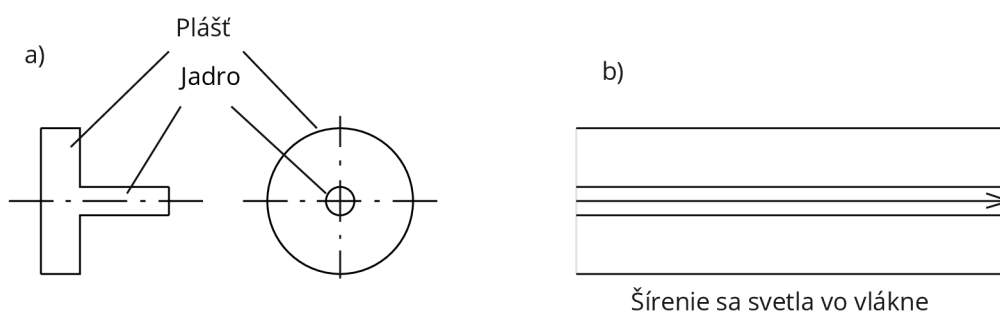
Optické vlákna, ktoré sú využívané v optických vláknových senzoroach sa delia na:

- jednovidové optické vlákna so skokovou zmenou indexu lomu
- mnohovidové optické vlákna so skokovou zmenou indexu lomu
- mnohovidové optické vlákna s plynulou zmenou indexu lomu

Výhodou jednovidových vláken je nižší útlm a preto sa používajú na dlhšie vzdialenosti. Avšak nevýhodou je menší priemer jadra, čo zapríčiňuje možnosť použitia menšieho optického výkonu a tým pádom aj menšiu presnosť merania. U mnohovidových vláken je možné využiť väčšieho optického výkonu, čím sa zvýši presnosť merania, ale zvýši sa aj útlm a preto sa používajú na kratšie vzdialenosti.[16]

1.1.1 Jednovidové optické vlákna so skokovou zmenou indexu lomu

Jednovidové optické vlákna majú malý polomer jadra a preto sú schopné viesť iba jeden svetelný vid (lúč). Rozmery jadra sú v rozmedzí 5-10 μm a rozmery plášťa 125 μm . Na obrázku 1.2 je znázornené prierez jednovidového vlákna a smer šírenia sa svetla v jadre vlákna. [13]



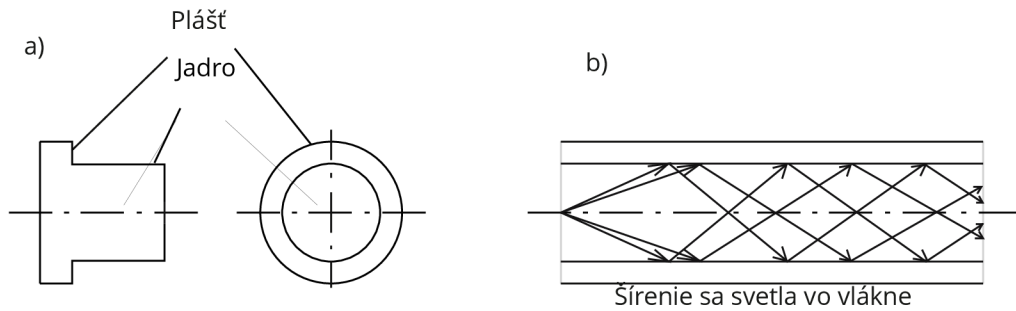
Obr. 1.2: Jednovidové vlákno a) prierez vlákna b) smer šírenia sa svetla vo vlákne [13]

1.1.2 Mnohovidové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu

Mnohovidové optické vlákna so skokovou zmenou indexu lomu majú výrazne väčší polomer jadra ako jednovidové vlákna a sú schopné viesť viac ako jeden svetelný vid (lúč). Typické rozmery jadra a plášťa sú 50/125 μm alebo 62,5/125 μm . Na obrázku 1.3 je znázornené prierez mnohovidového vlákna so skokovou zmenou indexu lomu a smer šírenia sa svetla v jadre vlákna. Šírenie svetla je založené na úplnom odraze na rozhraní jadro – plášť (index lomu jadra $n_1 >$ index lomu plášťa n_2). Celosklenené vlákno môže byť upravené náhradou plášťa plastovým povlakom s indexom lomu menším ako má index lomu jadro, čím vznikne takzvané plastic clad silica PCS vlákno. Toto vlákno má sklenené jadro a plášť z plastu. Takýmto spôsobom sa je možné využiť jadro s väčším polomerom 100 - 150 μm [13]

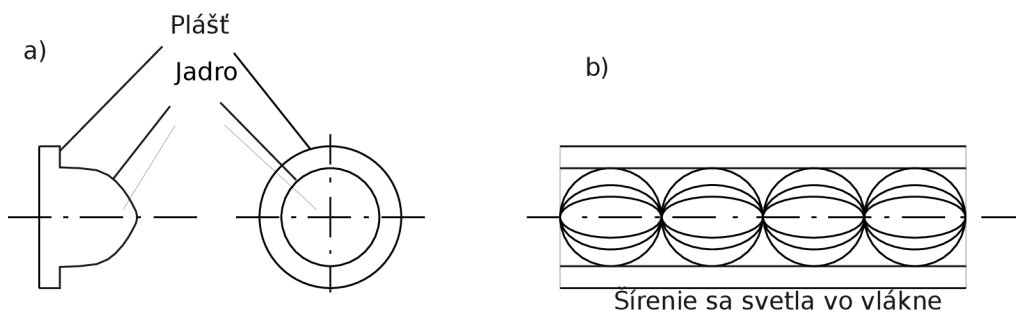
1.1.3 Mnohovidové vlákna s plynulou zmenou indexu lomu

Mnohovidové vlákna s plynulou zmenou indexu lomu majú nerovnomerný index lomu jadra. Dôvodom nerovnomernosti indexu lomu jadra je vyšší index lomu jadra pri osi jadra a kontinuálne sa znižuje s pohybom smerom k rozhraniu jadro/plášť. Index lomu plášťa je však konštantný a preto je profil indexu lomu jadra približne parabolický. Týmto spôsobom je rýchlosť šírenia sa lúčov vo vlákne odlišná a na



Obr. 1.3: Mnohovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu a) prierez vlákna b) smer šírenia sa svetla vo vlákne [13]

konci vlákna sú približne v rovnakom čase. Vďaka tomu sa odstráni efekt vidovej disperzie a preto je možné použiť väčšiu šírku pásma signálu.[14] Priemery jadra a plášťa sa používajú $50/125 \mu\text{m}$ a $62,5/125 \mu\text{m}$. Na obrázku 1.4 je znázornené prierez mnohovidového vlákna so skokovou zmenou indexu lomu a smer šírenia sa svetla v jadre vlákna.[13]



Obr. 1.4: Mnohovidové vlákno s plynulou zmenou indexu lomu a) prierez vlákna b) smer šírenia sa svetla vo vlákne [13]

1.2 Parametre optických vlákien

1.2.1 Útlm optického vlákna

Pri prechode svetla vláknom dochádza k útlmu, ktorý je spôsobený vláknom samotným.[1] To znamená, že výkon signálu so vzdialenosťou od zdroja postupne klesá. Hodnota útlmu optického vlákna sa s pravidla udáva v dB/km . Matematicky je ho možné definovať vzťahom 1.1

$$u(\lambda) = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1.1)$$

kde P_1 je vstupný svetelný výkon, P_2 je výstupný svetelný výkon a λ je vlnová dĺžka.

Hlavnými príčinami útlmu je absorpcia a rozptyl svetelných lúčov. Straty vznikajú priamo v materiáli vlákna, na rozhraní prostredia vlákna, pri spojovaní vlákien a na mikroohyboch a makroohyboch vlákna.[13]

1.2.2 Chromatická disperzia

Ďalším prirodzeným útlmom je chromatická disperzia. Závisí od vlnovej dĺžky použitého svetla. Spôsobuje skreslenie vstupného impulzu. Vzniká spojením materiálovej a vlnovej disperzie. Pre účely merania nie je až tak dôležitá, avšak treba voliť správne parametre svetelného lúča. [6]

1.2.3 Numerická apertura – NA

Numerická apertura definuje pod akým najväčším uhlom je možné svetelný lúč naviazať do optického vlákna, tak aby bol prenášaný vláknom. Číselne je NA vyjadrená ako $\sin\phi_a$. Pod týmto uhlom je možné svetelné lúče naviazať do vlákna. Svetelné lúče dopadajúce na vstup pod väčším uhlom nie je možné naviazať do vlákna a preto sa ním šíriť nebudú. Veľkosť NA u vlákien s homogénnym jadrom a skokovou zmenou indexu lomu je možné vyjadriť vzťahom:1.2

$$NA = \sin\phi_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.2)$$

kde n_1 je index lomu materiálu jadra a n_2 je index lomu materiálu plášťa.[13]

1.2.4 Rayleighov rozptyl

Ide o lineárny rozptyl, čo znamená, že za predpokladu, že vlákno je ideálne rovnomerné po celej svojej dĺžke, späťne rozptýlená optická energia v ktoromkoľvek bode je lineárne úmerná optickej energii šíriacej sa dopredu na rovnakej pozícii. Rayleighov rozptyl sa zvyčajne týka fluktuácií indexu lomu, ktoré vyplývajú z hustoty a nehomogenít štruktúry vlákna pri výrobnom procese kedy sa vlákno ochladzuje z teploty mäknutia vlákna na izbovú teplotu. Rayleighov rozptyl vzniká rozptylom svetla z čiastočiek alebo iných zdrojov pri fluktuácií indexu lomu, ktoré sú výrazne menšie ako vlnová dĺžka použitého svetla. Intenzita rozptylu je závislá na použitej vlnovej dĺžke svetla. K väčšej intenzite rozptylu dochádza pri použití kratšej vlnovej dĺžky, rovnako sa zväčšujú aj straty pri využití kratších vlnových dĺžok. Pri Rayleighovom rozptyle dochádza k prednému rozptylu, to sa šíri rovnakým smerom

ako svetlo, ktoré vyvolalo tento rozptyl a k spätnému rozptylu, ktoré sa šíri späť k zdroju a je základom pre optickú reflektometriu v časovej oblasti OTDR a optickú reflektometriu vo frekvenčnej oblasti OFDR.[15]

1.2.5 Ramanov rozptyl

Ramanov rozptyl využíva neelastický rozptyl fotónov. Molekulárne vibrácie skla indukované dopadajúcim svetelným impulzom spôsobujú rozptyl tohto svetla. Dôsledkom toho je obohatenie spektra šíriaceho sa svetla, ktoré zahŕňa takzvanú Stokesovu zložku s vlnovou dĺžkou λ_s väčšou, ako je vlnová dĺžka pôvodného impulzu a anti-Stokesovu zložku s vlnovou dĺžkou λ_a menšou, ako je vlnová dĺžka pôvodného impulzu.[2] Dôležitosť Stokesovej a anti-Stokesovej zložky pri snímaní teploty je, že pomer intenzity medzi týmito zložkami je teplotne závislý. Snímanie teploty pomocou Ramanovho rozptylu je bližšie popísaný v kapitole OTDR založená na Ramanovom rozptyle.

Pre meranie s využitím Ramanovho rozptylu je za potreby použitý vysokovýkonný laser, keďže Ramanov rozptyl je relatívne slabý. Avšak maximálna hodnota výkonu lasera je limitovaná inak dôjde k stimulovanému Ramanovmu rozptylu, ktorý sa bežne nevyužíva pri meraní teploty. Keď laserový výkon a jeho akumulovaná intenzita rozptylu prekročí určitú hodnotu, spojenie medzi laserovým výkonom a Ramanovým rozptylom sa stane tak intenzívnym, že sa laserový výkon rýchlo spojí s ramanovými pásmami, ktoré sú uvedené pre stimulovaný Ramanov rozptyl. Kritický bod medzi spontánnym Ramanovým rozptylom a stimulovaným Ramanovým rozptylom je kvantifikovaný prahom stimulovaného Ramanovho rozptylu.[15]

$$\frac{g_R P_R^{cr} L_{eff}}{A_{eff}} \approx C \quad (1.3)$$

kde Ramanov zisk $g_R \approx 1 \times 10^{-13}$ m/W na 1 μm vlnovej dĺžky, P_R^{cr} je prah výkonu, A_{eff} je efektívna oblasť, $C = 16$ v prednom smere, $C = 20$ v spätne polarizovanom prípade, $C = 40$ v spätne nepolarizovanom prípade a L_{eff} je efektívna dĺžka vlákna. V prípade dlhých dĺžok vlákna, ak sa berie do úvahy útlm vlákna, tento prah sa blíži ku konštantnej hodnote. Napríklad pre jednojádrové vlákna sa udáva hodnota prahu 3 W pre 10 km vlákno. Prah výkonu lasera pre senzorické účely sa udáva od niekoľko mW až do okolo 500 mW. Hodnota prahu pre jednojádrové a mnohójádrové vlákna je rozdielna hlavne kvôli efektívnej oblasti každého typu vlákna.[15]

1.2.6 Brillouinov rozptyl

Brillouinov rozptyl vzniká pri interakcii svetelnej vlny s akustickou vlnou. Akustické vlny vytvárajú periodickú moduláciu indexu lomu. Brillouinov rozptyl nastáva, keď

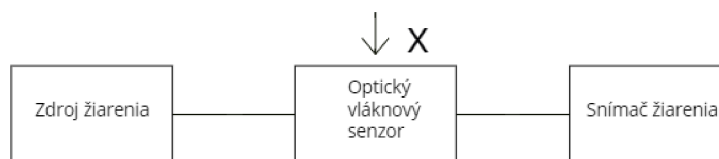
je na tejto pohyblivej mriežke svetlo spätne rozptýlené, čo vedie k frekvenčnému posunu medzi pôvodným svetelným impulzom a Brillouinovou vlnou.[12] Frekvenčný posun Brillouinového spektra je citlivý na teplotu a mechanické napätie. Frekvenčný posun závisí najmä od veľkosti pozdĺžneho napätia, ktoré vyplýva zo skutočnosti, že pri rôznych podmienkach pozdĺžneho napätia je odlišná frekvencia akustických vln indukovaná fotónmi.[5] Ako aj u Ramanovho rozptylu aj k Brillouinovmu rozptylu dochádza spontánne a stimulovane. K spontánnemu Brillouinovmu rozptylu dochádza pri interakcii vstupného impulzu s akustickou vlnou, ktorá je tvorená fonónmi vzniknutými pri tepelne poháňanými fluktuáciami hustoty materiálu.[18] K stimulovanému Brillouinovmu rozptylu dochádza, ak je výkon vstupného impulzu dostatočne veľký, aby spôsobil zmenu hustoty materiálu prostredníctvom mechanizmu známeho ako elektrostriekcia, čím sa materiál stáva hustejším v miestach, kde je gradient optickej intenzity vysoký. Periodická zmena materiálovej hustoty sa javí ako pohybujúci sa index lomu Braggovej mriežky a to zapríčiňuje rozptyl svetla vstupného impulzu. Časť optického výkonu vstupného impulzu je prevedená na Stokesovu vlnu, ktorá sa šíri v spätnom smere.[21]

2 Optické vláknové senzory - všeobecne

2.1 História optických vláknových senzorov – OVS

Už v prvej polovici 20. storočia bol vytvorený prvý OVS – optický vláknový endoskop. Napriek tomu väčší výskum v tejto oblasti sa začal až v sedemdesiatych rokoch 20. storočia a to potrebami armády detegovať ultratiché ponorky (optický vláknový hydrofón).[2] V dnešnej dobe je stále väčší dopyt na získavanie, spracovávanie a vyhodnocovanie informácií. Získavanie a spracovanie informácií množstva premenných je dôležitou súčasťou rôznych sektorov, či už ide o biomedicínu, transport, stavebníctvo, robotiku atď. Preto je dôležité tieto fyzické parametre ako teplota, radiácia, atď, získať, vyčísliť a previesť na inú veličinu (väčšinou elektrickú). Kvôli vysokým požiadavkám na presnosť, rýchlosť a spoľahlivosť, ale zároveň aj klesajúcej cene optických komponentov sa do popredia stále viac a viac dostávajú optické vláknové senzory. [1]

2.2 Princíp optických senzorov obecne



Obr. 2.1: Obecná bloková schéma OVS [3]

Na obrázku 2.1 je znázornená jednoduchá bloková schéma meracieho kanálu. V tejto schéme sú zobrazené základné časti: zdroj žiarenia, optický vláknový snímač a snímač žiarenia, ktoré sú prepojené optickým vláknom. Pomocné zariadenia ako napájacie zdroje, zosilňovače, indikačné a vyhodnocovacie jednotky nie sú zobrazené.

Zdrojom optického žiarenia je zvyčajne LED dióda alebo laserová dióda. Charakteristickými vlastnosťami zdroja sú: vlnová dĺžka λ , šírka pásma $\Delta\lambda$, optický výkon, stabilita a druh prevádzky. Snímačom optického žiarenia je väčšinou fotodióda, dióda PIN alebo lavínová dióda. Výber závisí od požadovaných parametrov ako sú citlivosť, odstup signál-šum a ďalšieho spracovania signálu. Typ OVS je volený podľa druhu meranej veličiny x , spôsobu modulácie, metódy merania a požadovaných parametrov. [3]

Pôsobením meranej fyzikálnej veličiny x na optický vláknový senzor dochádza k zmenám:

- indexu lomu optického vlákna (n)
- absorpcie (a)
- emisie, resp. fluorescencie (e)

K meraniu sa používajú OVS s rôznou moduláciou (amplitúdová, fázová, polarizačná a modulácia vlnovej dĺžky). [3]

Dôležitým faktorom pri OVS je obmedzenie citlivosti vlákna iba na požadovanú veličinu, ktorú je potrebné merať. Jednou z možností je dopovanie vlákna rôznymi chemickými prvkami ako napr. neodýmium, erbium, germanium atď. Týmto prvkami je možné ovplyvniť absorpciu teplotnej závislosti, fluorescenčné spektrá a zlepšiť koeficient Ramanovho rozptylu. [1]

Ďalšou možnosťou je využitie takzvaného vysoko dvojlomového vlákna. Dvojlom β optického vlákna súvisí s indexami lomu na rýchlej osi n_y a pomalej osi n_x , $\beta = n_y - n_x$. [9] Tieto osi sú založené na rýchlosti, ktorou svetlo polarizované pozdĺž nich prechádza vo vnútri vlákna. Pri naviazaní svetelného lúča s nízkou energiou do vlákna so smerom polarizácie orientovaným v uhle vzhľadom na pomalú os. Stav polarizácie sa bude pozdĺž vlákna periodicky meniť s lineárnej na eliptickú a späť na lineárnu. Vzdialenosť za ktorú stav polarizácie nadobudne počiatočnú hodnotu sa nazýva záznejová dĺžka (beat length) L_B . [10] Záznejová dĺžka je definovaná vzťahom: 2.1

$$L_B = \frac{\lambda}{\beta} \quad (2.1)$$

kde λ je vlnová dĺžka použitého svetla.

U vysoko dvojlomových vlákien sa dobrovoľne zavádzajú asymetrie prierezu. Je možné vytvorenie eliptického jadra alebo stláčaním vlákna v preferovanom (pričnom) smere. Týmto spôsobom dôjde k lineárnemu dvojlomu. Dôležitým charakteristickým parametrom pre vysoko dvojlomové vlákna je záznejová dĺžka L_B spomínaná vyššie. Pre typické vysoko dvojlomové vlákna je záznejová dĺžka rádovo niekoľko milimetrov. [1]

2.3 Vlastnosti OVS

Optickými vláknovými senzormi je možné merať prakticky akúkoľvek fyzikálnu veličinu, ako napríklad vlhkosť, zvuk, tlak, teplota, atď. Hlavnými vlastnosťami sú malé rozmery, čo súvisí s ich malou hmotnosťou, sú pasívne, majú malú spotrebu, sú rezistentné voči elektromagnetickému ovplyvneniu, vysoká senzitivita, veľká šírka pásma. V minulosti bola hlavnou nevýhodou cena, avšak v súčasnosti sú cenovo dostupné pre každého. [4]

2.4 Rozdelenie OVS

Optické vláknové senzory je možné deliť podľa rôznych kritérií: podľa spôsobu modulácie, spôsobu zapojenia, konštrukcie snímača, atď. [3]

Z hľadiska konštrukcie je možné rozdeliť optické vláknové senzory na:

- intrinsic (vlastné) - optické vlákno je buď priamo modulované účinkom prostredia alebo prostredníctvom zmien dĺžky optickej dráhy vyvolaných prostredím
- extrinsic (nevlastné) - optické vlákno ide do a z takzvaného „black box“, ktorý moduluje prechádzajúci svetelný lúč podľa vplyvu vonkajšieho ovplyvnenia. [5]

Z hľadiska dimenzie je možné rozdeliť optické vláknové senzory na:

- bodové OVS - merajú veličinu snímajú v jednom bode
- distribuované OVS - umožňujú snímať meranú veličinu vo viacerých bodoch pozdĺž optického vlákna[2]

Optické vláknové senzory je možné rozdeliť podľa meranej veličiny. Príklad fyzikálnych veličín, ktoré je možné merať pomocou OVS: teplota, zrýchlenie, vibrácie, elektrické a magnetické pole, tlak, zvuk, vlhkosť, pnutie a iné.[5]

Optické vláknové senzory sú založené na sledovaní zmien optického signálu prechádzajúceho optickým vláknom. Tieto zmeny dochádzajú u rôznych parametrov ako je intenzita, polarizácia, atď. Vo všeobecnosti je možné monochromaticky optický signál $\vec{E}(\vec{r}, t)$ zapísať ako:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t)e^{i(\omega t + \phi(\vec{r}, t))} \quad (2.2)$$

kde $\vec{A}(\vec{r}, t)$ je amplitúda optického signálu, ω je uhlová frekvencia optického signálu a $\phi(\vec{r}, t)$ je fáza optického signálu.

Na základe týchto parametrov sa OVS delia na:

- senzory založené na základe intenzity alebo amplitúdy
- senzory založené na základe polarizácie
- senzory založené na základe frekvencie
- senzory založené na základe fázy[2]

2.4.1 Senzory založené na základe amplitúdy/intenzity

Tieto senzory patria medzi najrozšírenejšie OVS. Ako už z názvu vyplýva využíva sa modulácia amplitúdy. Mechanizmy, ktorými je možné ovplyvnenie amplitúdy šíriaceho sa žiarenia sa dajú rozdeliť do nasledujúcich skupín:

- zmena tlmenia
- zmena vidovej štruktúry žiarenia šíriaceho sa vláknom
- zmena vzájomnej väzby vlákien
- zmena okrajových podmienok
- generácia žiarenia[2]

Senzory využívajúce zmenu tlmenia

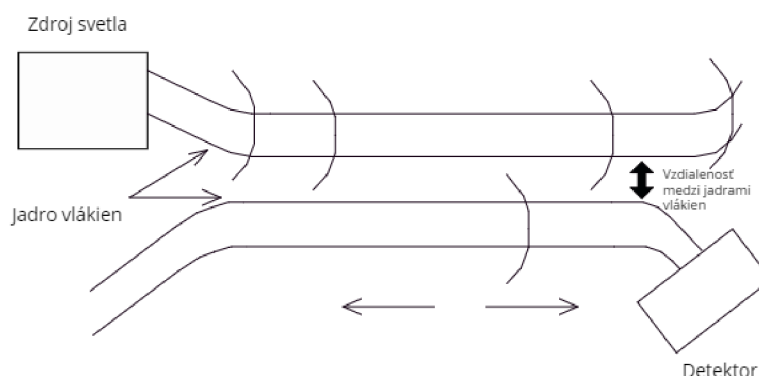
Meraná veličina pôsobí priamo na optické vlákno, následkom čoho dochádza k zvýšenému útlmu. Vplyvom ionizujúceho žiarenia sa zvýši koeficient tlmenia vlákna, potom je možné využiť optické vlákno ako dozimeter na meranie rádioaktívneho žiarenia. Veľkosť útlmu optického vlákna určujú parametre radiačného žiarenia, konštrukcie a zloženia optického vlákna a druhu signálu prechádzajúceho vláknom.[6] Jednou s možností teplotných senzorov je pridanie vzácnych druhov zemín do materiálu vlákna. Tým vzniknú absorpčné pásma s ostrými hranami, ktoré majú vysokú citlivosť na zmenu teploty. [2]

Senzory využívajúce zmeny vidovej štruktúry žiarenia šíriaceho sa vláknom

Využíva sa vplyv meranej veličiny na vidovú štruktúru optického poľa šíriaceho sa mnohovidovým vláknom. Pri zakrivení vlákna dochádza k transformácii vyšších vidov na nižšie. Tento typ senzorov sa môže používať na meranie tepu, dýchania, zmeny polohy pacientov pripútaných na lôžku. [2]

Senzory so zmenou vzájomnej väzby vlákien

Tento senzor je príkladom využitia evanescentnej väzby medzi dvoma paralelnými vláknami. Jav evanescentnej vlny spočíva v šírení svetla nie len v jadre vlákna, ale časti svetla, ktoré preniká aj do jeho plášťa. Toto svetlo sa nazýva evanescentná vlna. Intenzita väzby medzi vláknami je funkciou vzdialenosti medzi týmito vláknami. Vonkajšími vplyvmi (teplota, tlak) zmenia vzdialenosť medzi vláknami a tým sa zmení aj väzobný koeficient. Preto sa zmení aj intenzita svetla v evanescentnej vlny. Sledovaním intenzity tejto vlny v druhom vlákne je možné sledovať zmeny prostredia. [5] Tento senzor je znázornený na obrázku 2.2



Obr. 2.2: Senzor založený na evanescentných vlnách [5]

Senzory so zmenou okrajových podmienok

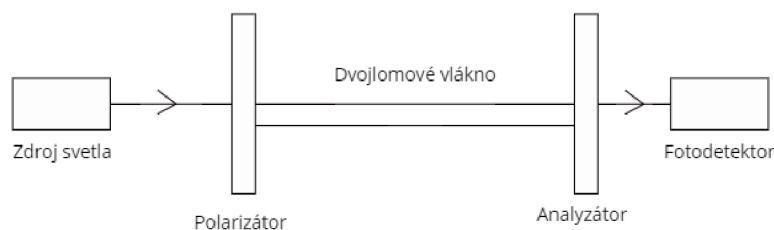
Využívajú hlavne podmienky absolútneho odrazu svetelného lúča šíriaceho sa vláknom. Jednou skupinou sú senzory založené na mikro-ohyboch. Pri mikro-ohyboch vo vlákne dochádza k zníženiu intenzity žiarenia na detektore. Ďalšou skupinou sú senzory využívajúce optické vlákno bez plášťa. Hodnota indexu lomu okolia jadra je teda závislá na prostredí v ktorom sa nachádza. Intenzita svetla klesne ak sa zmení index lomu napr. ponorením optického hranola do vody (vzduch/voda).[6]

Senzory s generáciou žiarenia

Využívajú indukované žiarenie v optickom materiály pôsobením optických, tepelných a iných vplyvov. Tento druh nepotrebuje ku svojej funkcii zdroj žiarenia. Vplyvom vonkajších vplyvov vzniká žiarenie priamo v optickom vlákne alebo v materiály na konci vlákna. [6] Príkladom môže byť senzor teploty, kde sa na koniec optického vlákna umiestni absolútne čierna dutina. Pri zvýšení teploty sa zvýši množstvo vyžarovanej energie v infračervenej oblasti spektra. Na základe spektrálneho profilu je pomocou úzkopásmových filtrov určená teplota.[2]

2.4.2 Senzory založené na základe polarizácie

Index lomu sa môže zmeniť následkom vonkajšieho rušenia (tlak, teplo, mechanické pnutie,...) na vlákno. Opäť môže byť využité samotné vlákno ako senzor alebo môže slúžiť ako spojovací prvok. Kvôli zložitosti polarizačného profilu mnohovidových vlákien sa používajú jednovidové vlákna s pevne definovanými polarizačnými vlastnosťami. Na obrázku 2.3 je znázornený jednoduchý polarimetrický senzor.[6]



Obr. 2.3: Princíp konštrukcie polarizačných OVS [5]

Tento senzor je tvorený polarizovaným svetelným žiarením zo svetelného zdroja cez polarizátor. Polarizované svetelné žiarenie je vyslané pod 45° uhlom k vlastným osiam dvojlomového vlákna tak, že sú rovanko vybudené oba základné vidy. Toto vlákno slúži ako senzorické vlákno. Analyzátorom sú zmeny polarizačného stavu

žiarenia transformované na zmeny veľkosti intenzity žiarenia. Táto intenzita prijatá fotodetektorom závisí na fázovom posune δ medzi dvomi otrogonálnymi vidmi šíriacimi sa vláknom podľa vzťahu 2.3:

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos \delta) \quad (2.3)$$

kde fázový posun δ je nositeľom informácie o snímanej veličine.[2] Pri tomto type senzorov je možné využiť niektoré fyzikálne javy. Fotoelastický jav sa využíva pri mechanickej deformácii vlákna napr. zatlačením preferovaným smerom na vlákno dochádza k deformácii vlákna, čo vyvolá dodatočný lineárny dvojlom vlákna, a ten je detekovaný polarizátorom na výstupe senzoru. Ďalšou možnosťou je meranie teploty pri ktorej dochádza k zmenám rozmeru vlákna. Sensory elektrického napätia a prúdu sú založené na základe Faradayovho javu. Dochádza v nich k otočeniu roviny polarizácie vplyvom magnetického poľa. Pôsobením magnetického poľa na optické vlákno s minimálnou hodnotou lineárneho dvojlomu dochádza k otočeniu polarizácie vstupného naviazaného lineárne polarizovaného žiarenia k otočeniu o uhol θ . [4]

2.4.3 Sensory založené na základe frekvencie

Snímaná veličina pôsobí na frekvenciu oscilácií elektromagnetického poľa. Výsledkom je frekvenčná modulácia optického signálu, alebo ide o spektrálne OVS. Pri nich dochádza k rozloženiu energie svetla medzi spektrum vlnových dĺžok. Príkladom frekvenčných OVS je Dopplerovsky merač rýchlosti na meranie rýchlosti kvapalín alebo plynov. [7] Pri meraní teploty a mechanického napätia je možné využitie spektrálnych OVS s Braggovskými optickými vláknovými mriežkami FBG. FBG je závislá na citlivosti indexu lomu a mriežkovej periódy na vonkajšie alebo mechanické zmeny alebo zmeny teploty. Rozťažnosť a stláčanie veľkosti mriežky priamo ovplyvňuje FBG deformačno-optickým efektom, ktorý ovplyvňuje index lomu. Bližšie sa FBG senzoru venuje kapitola Distribuované optické vláknové senzory. [4]

2.4.4 Sensory založené na základe fázy

Patria medzi najcitlivejšie senzory a využívajú fázovú moduláciu svetelnej vlny, ktorá sa šíri v optickom vlákne. Fáza optického signálu je ovplyvnená dĺžkou vlnovodu, indexom lomu, prierezom optického vlákna.[6]

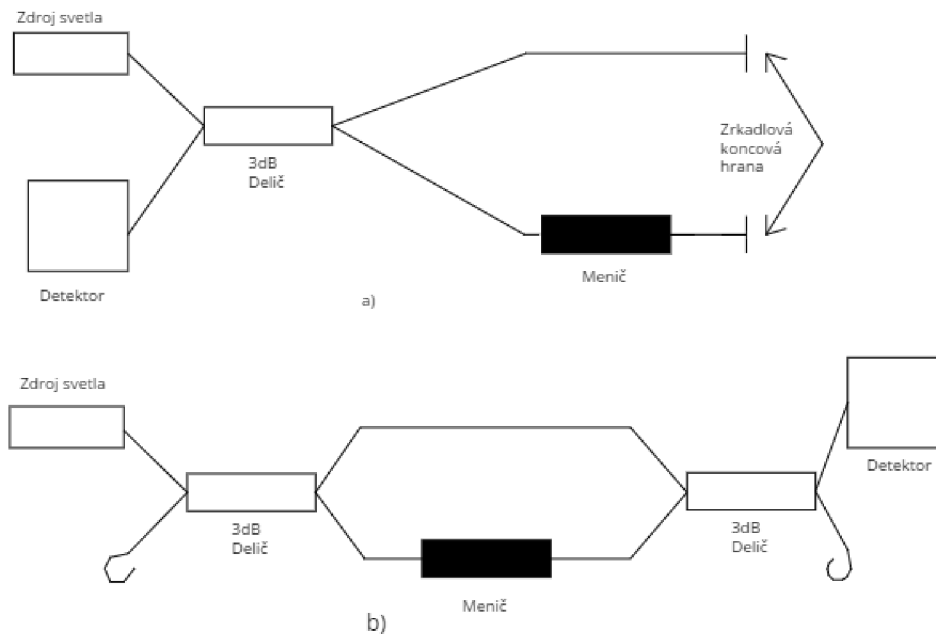
Vzťah medzi fázou optického signálu a optickou dráhou môžeme napísať ako:2.4

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda}nL \quad (2.4)$$

kde ϕ je fáza, λ je vlnová dĺžka a nL reprezentuje optickú dráhu, to znamená dĺžku trasy L , ktorú prejde svetelný lúč v prostredí s indexom lomu n . Citlivosť týchto

senzorov závisí na vlnovej dĺžke, ktorá je veľmi malá a pri malej zmene optickej dráhy dôjde k veľkej zmene fázy optického signálu. Preto je citlivosť týchto senzorov vyššia.[2]

Fáza svetla prechádzajúceho cez vlákno je modulovaná polom, ktoré má byť detekované. Táto fázová modulácia je detekovaná interferometrickým porovnaním fázy svetla v testovanom vlákne s fázou svetla v referenčnom vlákne. V interferometri je svetelný lúč rozdelený na dva lúče. Jeden z nich je vystavený skúmanému prostrediu dochádza v ňom k posunu fázy a druhý je izolovaný od tohto prostredia a je použitý ako referenčný lúč. Po zlúčení lúčov, tieto lúče vzájomne interferujú. Na obrázku 2.4 je znázornený Michelsonov a Mach-Zehnderov interferometer. Tieto interferometre sú jedny z najznámejších interferometrov. Pretože svetelný lúč u Michelsonovho interferometra prechádza snímaným aj referenčným vláknom dvakrát postačuje iba jeden delič a preto môže mať lepšiu citlivosť. Je potrebné kvalitné odrazové zrkadlo.[8]



Obr. 2.4: Schematický diagram a) Michelsonovho a b) Mach-Zehnderovho interferometra [8]

2.5 Použitie

Na základe vlastností, ktoré sú spomenuté vyššie je možné využiť OVS tam, kde bežné senzory sú nepresné alebo vôbec nefungujú. Funkčnosť bežných senzorov môže ovplyvňovať silné elektromagnetické, radiačné žiarenie, atď. Preto sa optické vláknové

senzory používajú v blízkosti transformátorov, alternátorov, káblov vysokého napätia, ale aj v jadrových elektrárnach, atď. Vďaka fotónovým sieťkam sa využívajú na meranie chemikálií. Ako je spomenuté dosahujú veľmi malých rozmerov a malej váhy a preto je ich využitie aj v letectve a preprave. V neposlednom rade distribuované a kvázi-distribuované senzory na meranie premenných (teplota, káble, optické káble využité na sieťové účely, atď), ale aj v stavebníctve, vinutí alternátoroch obrovských strojoch na výrobu elektrickej energie. [1]

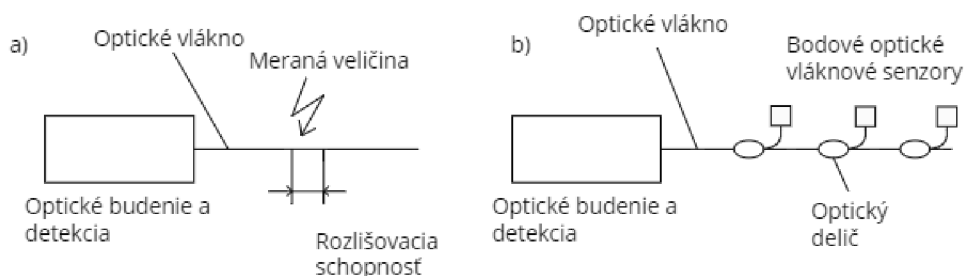
3 Distribuované optické vláknové senzory

Jednou z najdôležitejších vlastností OVS je možnosť implementovať distribuované snímanie. Viacbodové meranie môže byť dosiahnuté použitím jedného vlákna. Z toho vyplýva, že na meranie sa používa samotné vlákno. To umožňuje meranie veľkého počtu bodov na relatívne veľkú vzdialenosť a pri tom poskytuje nízku hmotnosť, malé rozmery a relatívne lacné riešenie. [5]

V princípe sú dva druhy distribuovaných OVS kvázi – distribuované senzory a plne distribuované senzory. 3.1. Kvázi – distribuovanými senzormi je možné meranie iba v daných preddefinovaných miestach vlákna pridaním nejakých špeciálnych opatrení. Kvázi–distribuované OVS majú na meranie citlivé iba určité sekcie vlákna. Výhodou je, že iba tieto predurčené časti vlákna sú schopné merať v požadovanom poli a preto je známa ich pozícia na vlákne. Avšak je potrebné ich identifikovať nejakým individuálnym znamením. Nevýhodou je, že tieto časti musia byť v meranom poli preddefinované dopredu. [1] Plne distribuovanými senzormi je možné meranie v hociktorom bode vlákna. Sú efektívne ak je potrebné meranie na veľkom počte bodov vlákna alebo súvisle na celom vlákne. Je možné nimi merať mechanické napätie vo veľkých stavbách ako sú budovy, mosty, hrádze, lietadlá atď, ale aj teplotu v systémoch elektrickej energie, kvalitu optických vlákien a monitorovanie sieťových vlákien, detekovanie netesností v potrubí.[5] Tieto senzory vznikli ako prvé a sú všestrannejšie oproti kvázi – distribuovaným, avšak kvázi – distribuované senzory sú jednoduchšie a lacnejšie. Oba typy sensorov je možné rozdeliť na dve skupiny využívajúce:

- systém lineárnych optických efektov
- systém nelineárnych optických efektov

Lineárne efekty sú jednoduchšie na implementáciu, avšak viazané na požiadavky na zdroj a detektor žiarenia. Nelineárne efekty ponúkajú viac možností a špecifické reakcie na merané veličiny. [1]



Obr. 3.1: Distribuované optické senzory: a) plne distribuované OVS b) kvázi–distribuované OVS[2]

Za ako prvý distribuovaný OVS sa dá považovať systém OTDR (optická vláknová reflektometria v časovej oblasti). Systém OTDR nebol primárne navrhnutý na meranie vonkajších vplyvov na merané vlákno, avšak je možné merať ohyb alebo prerušenie vlákna a to na celej dĺžke vlákna. Princíp merania je založený na spätnom odraze z Reyleighovho rozptylu s malých nehomogenít a nečistôt vlákna a Fresnelovho odrazu z napríklad ukončenia vlákna. [1]

3.1 Výkonostné parametre distribuovaných OVS

Výkonostné parametre charakteristické pre distribuované OVS systémy:[1]

- Priestorová rozlišovacia schopnosť δl je najmenšia dĺžka vlákna na ktorej je možné detegovať zmenu v meranom prostredí. Odmeraných je niekoľko hodnôt a každá z týchto hodnôt reprezentuje veľkosť meranej veličiny spriemerovanú na časť vlákna o dĺžke δl . V istom zmysle takýto systém vyzerá ako systém zložený z $L/\delta l$ senzorov v lineárno poli. L je celková dĺžka meraného vlákna v metroch.
- Citlivosť S je definovaná ako zmena optického výkonu na detektore, ktorá je produktom zmeny v meranom poli na jednotku dĺžky vlákna ($W \text{ field}^{-1} m^{-1}$).
- Šírka pásma merania B je šírka pásma pri ktorej je možné zaznamenať zmeny v meranom poli na celej dĺžke vlákna L (Hz).
- Šírka pásma systému W je šírka pásma, ktorú musí detektor vedieť rozpoznať aby tento systém mohol fungovať. Musí to byť hodnota pri ktorej detektor je schopný reagovať na príchod optického pulzu rozlišovacej dĺžky δl (Hz).
- Dynamický rozsah D je rozsah maximálnych a minimálnych hodnôt meraného poľa, ktoré je možné merať s požadovanou presnosťou (dB).
- Presnosť merania je presnosť s ktorou je detektorom možné merať výstupný optický výkon vzhľadom na úroveň šumu v systéme (%)
- Vlastnosti vlákna: systémové vlastnosti musia zahrňovať vlastnosti používaného vlákna aby, ak je to nutné bola možná modifikácia a aby bolo uľahčené porozumenie anomálií v systéme.

Nie je možné aby boli všetky parametre najlepšie a preto je nutné nájsť balans medzi jednotlivými parametrami. Príkladom môže byť pomer citlivosti a priestorovej rozlišovacej schopnosti. Aby bola citlivosť vysoká je potrebné aby priestorová rozlišovacia schopnosť bola veľká, ale aby bola priestorová rozlišovacia schopnosť dobrá je nutné aby bola malá.[1]

3.2 Metódy merania teploty distribuovaných OVS

V tejto kapitole sú popísané metódy na meranie teploty u distribuovaných optických vláknových senzorov.

3.2.1 C–OTDR s využitím Rayleighovho rozptylu

C–OTDR označuje koherentú optickú reflektometriu v časovej oblasti. Pri tejto metóde sa využíva Rayleighov rozptyl. Index lomu vlákien a veľkosť každého bodu Rayleighovho rozptylu závisí od teploty a mechanického napätia, a preto sa komplexná amplitúda svetla Rayleighovho rozptylu v každom mieste vlákna mení podľa podmienok prostredia v ktorom sa vlákno nachádza. Proces možno lokálne modelovať ako slabú vláknovú Braggovu mriežku (FBG) s náhodnou amplitúdou a rozstupmi. Rayleighov rozptyl sa dá snímať pomocou metódy koherentnej OFDR alebo koherentnej OTDR. Snímaním vlnovej dĺžky lasera a porovnaním odozvy s referenčnou hodnotou je možné získať ekvivalentný index lomu a zmenu mriežkovej periódy, a takto získať zmeny hodnoty teploty alebo deformácie vlákna. Vysoká citlivosť merania sa dá doceliť použitím veľkého snímaného frekvenčného rozsahu (niekoľko desiatok GHz). Tým sa zvyšuje čas merania a náklady snímacieho systému, najmä ak je potrebný malý frekvenčný skok. [17]

Postupom optického impulzu vláknom, svetlo zo spätného Rayleighovho rozptylu získané z odlišných bodov sa vzájomne ovplyvňuje, čo spôsobuje, že zobrazenie grafu intenzity v časovej oblasti je zúbkaté. Pri metóde C–OTDR sa opakuje získavanie Rayleighových grafov intenzity využitím rôznych optických frekvencií f lasera, takže grafy namerané v danom čase t je možné označiť ako $R_t(z, f)$, kde f je snímaná frekvencia v rozsahu, ktorý je určený maximálnou detekovateľnou zmenou teploty. Je potreba využitia referenčného grafu $R_r(z, f')$, ktorá je frekvenčne vzájomne korelovaná s reálnym Rayleighovým meraním $R_t(z, f)$. Vzájomná korelácia daná vzťahom 3.1 poskytuje informáciu o frekvenčnom posune na pozícii z_0 daný vzťahom 3.2, ktorý spôsobuje zmena teploty alebo deformácia vlákna.[17]

$$X_{corr}(z_0, f - f') = R_t(z_0, f) * R_t(z_0, f') \quad (3.1)$$

kde $X_{corr}(z_0, f - f')$ je vzájomná korelácia dvoch meraní, $R_t(z_0, f)$ je výsledok merania pri optickej frekvencii f , $R_t(z_0, f')$ je výsledok referenčného merania pri optickej frekvencii f' , z_0 pozícia na vlákne.

$$\Delta f = f - f' \quad (3.2)$$

kde Δf je frekvenčný posun, f a f' optické frekvencie lasera

Pri meraní veľkého rozsahu teploty veľká zmena teploty ΔT môže viesť k tak veľkému frekvenčnému posunu Δf , ktorý je mimo celkového snímacieho rozsahu, čo vedie k nepresnému meraniu zmeny teploty ΔT . Možným riešením je vzájomná korelácia merania $R_{t_{i-1}}(z, f)$ s nasledujúcim meraním $R_{t_i}(z, f)$, ktoré sú merané pri malej zmene rozsahu snímanej frekvencie Δf . Týmto spôsobom je docieľené využitie len nízkej snímačej frekvencie. Takýmto spôsobom je možné celkový snímací frekvenčný posun vyjadriť ako: 3.3 [17]

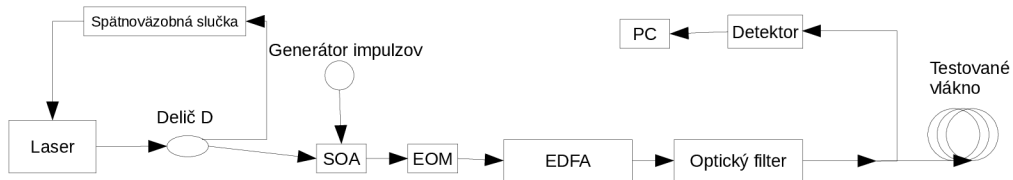
$$\Delta f = \sum_{i=1}^N \Delta f_i \quad (3.3)$$

kde Δf je celkový frekvenčný posun, Δf_i je frekvenčný posun pri meraní i , N je celkový počet meraní.

Podobne ako pri metóde s využitím Brillouinovo rozptylu, frekvenčný posun, v tomto prípade vypočítaný vzájomnou koreláciou, je závislý na mechanickom predĺžení a teplote. Platí vzťah: 3.4

$$\Delta f = C_1 \Delta \varepsilon + C_2 \Delta T \quad (3.4)$$

kde Δf je frekvenčný posun, C_1 a C_2 sú koeficienty predĺženia a teploty, $\Delta \varepsilon$ zmena predĺženia vlákna a ΔT zmena teploty.[22]



Obr. 3.2: Konfigurácia C-OTDR na meranie teploty [17]

Na obrázku 3.2 je zobrazená schéma zapojenia merania teploty s využitím C-OTDR. Svetlo z kontinuálneho lasera je privedené na delič, kde sa rozdeľuje na dve cesty. Horná je pripojená k spätnoväzobnej slučke, ktorá zabezpečuje stabilnú absolútnu laserovú frekvenciu. Dolná cesta je napojená na polovodičový optický zosilňovač (SOA), ktorý sa používa na generovanie impulzov s vysokým rozdielom medzi výkonnými úrovňami. Optická frekvencia impulzov je snímaná elektro-optickým modulátorom (EOM), ktorý je riadený zdrojom mikrovlnného žiarenia. FBG má za úlohu vybrať jedno z dvoch postranných pásiem vygenerovaných modulátorom EOM. Potom sú optické impulzy zosilnené zosilňovačom s vláknom dopovaným eribiom (EDFA)

a filter je určený k potlačeniu náhodnému šumu vytvorenému pri zosilnení impulzov. Impulzy sú vyslané do testovaného vlákna a signál Rayleighovho rozptylu je detekovaný na detektore.[17]

3.2.2 OTDR s využitím Ramanovho rozptylu

Na obrázku 3.3 je znázornený OTDR na snímanie teploty s využitím Ramanovho rozptylu. Zdroj impulzov vysielá impulzy o vlnovej dĺžke λ_p . Impulzy sú vysielané do testovaného vlákna cez delič, ktorý separuje tieto impulzy a späťne rozptýlené svetlo. V schéme je pridaný spektrometer pred fotodetektor aby bolo možné rozlíšiť Stokesovu a anti-Stokesovu zložku. Pretože signál z Ramanovho rozptylu je veľmi slabý bežne sa spriemeruje spätný rozptyl z viac vstupných impulzov aby sa zlepšil pomer signál/šum. Často sa používa referenčná cievka (umiestnená pri známej teplote) medzi delič a testované vlákno na odstránenie potenciálnych premenných parametrov, ktoré by mohli ovplyvniť meranie. Bežne sa používa vzťah 3.5, ktorý vyjadruje pomer intenzity medzi anti-Stokesovou a Stokesovou zložkou[18]

$$R(T) = \left(\frac{K_{as}}{K_s}\right) \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}}\right)^4 \exp\left(-\frac{S_{LE}}{T}\right) \quad (3.5)$$

kde koeficienty $K_{as(s)}$ sú primárne určené Ramanovou časťou anti-Stokesovej a Stokesovej zložky definované filtrami na výber Ramanových zložiek, $\lambda_{as(s)}$ sú vlnové dĺžky anti-Stokesovej a Stokesovej zložky, koeficient S_{LE} je definovaný vzťahom 3.6 a T je absolútna hodnota teploty.

$$S_{LE} = hc\nu_R/k_B \quad (3.6)$$

kde h je Planckova konštanta, c je rýchlosť svetla vo vákuu, ν_R je Ramanov frekvenčný posun a k_B je Boltzmanova konštanta.

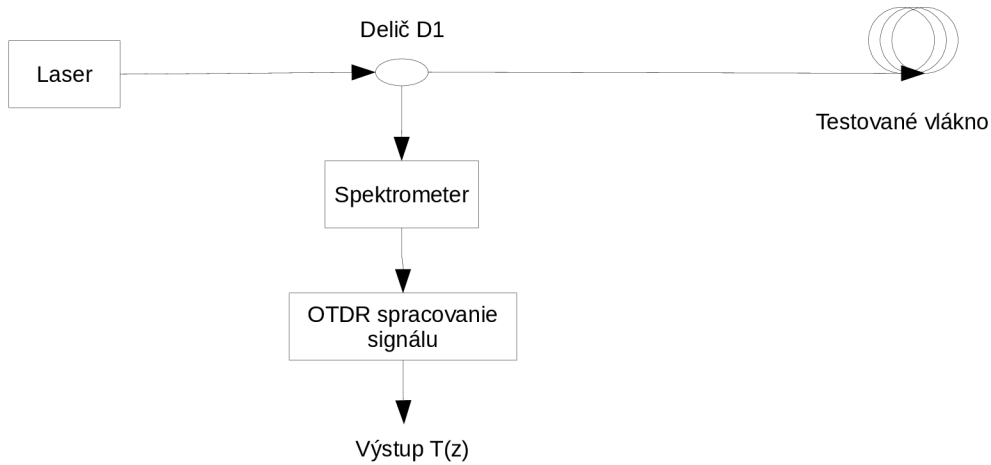
Signál spätného rozptylu je daný ako funkcia vzdialenosti z vo vlákne. Pri šírení sa svetla vo vlákne dochádza k útlmu a preto je potrebné zahrnúť útlm anti-Stokesovej a Stokesovej zložky do vzťahu 3.5, následne tento vzťah sa dá zapísať:[18]

$$R(T(z)) = \left(\frac{K_{as}}{K_s}\right) \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}}\right)^4 \exp\left(-\frac{S_{LE}}{T(z)}\right) \exp\left(-\int_0^z (\alpha_{as}(u) - \alpha_s(u))du\right) \quad (3.7)$$

kde α_{as} a α_s reprezentujú útlm anti-Stokesovej a Stokesovej zložky.

Pomocou referenčnej cievky je možné získať referenčnú hodnotu pomeru intenzity anti-Stokesovej a Stokesovej zložky v referenčnej cievke vzťahom:[19]

$$R(T(z_{ref})) = \left(\frac{K_{as}}{K_s}\right) \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}}\right)^4 \exp\left(-\frac{S_{LE}}{T(z_{ref})}\right) \exp\left(-\int_0^{z_{ref}} (\alpha_{as}(u) - \alpha_s(u))du\right) \quad (3.8)$$



Obr. 3.3: Princíp OTDR založený na Ramanovom rozptyle [5]

kde $T(ref)$ je teplota snímaná na referenčnej cievke a z_{ref} je pozícia referenčnej cievky.

Keď je známa referenčná teplota (teplota snímaná na referenčnej cievke) je možné vydeliť rovnicu 3.7 rovnicou 3.8 a dostať normalizovanú rovnicu pomerov Ramanových zložiek 3.9 ako funkciu teploty na vzdialenosti z . Tým sa odstránia parametre $K_{as(s)}$ a $\lambda_{as(s)}$ [19]

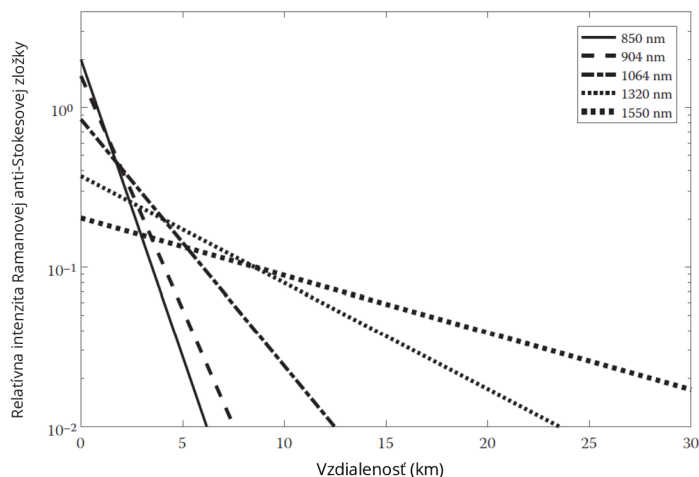
$$\bar{R}(T(z)) = \frac{R(T(z))}{R(T(z_{ref}))} \exp\left(S_{LE} \left(\frac{1}{T_{ref}} \frac{1}{T(z)}\right)\right) \exp\left(-\int_{z_{ref}}^z (\alpha_{as}(u) - \alpha_s(u))du\right) \quad (3.9)$$

V tomto prípade je z_{ref} koniec referenčnej cievky, respektíve začiatok testovaného vlákna. Zo vzťahu 3.9 je vidieť, že pomer Ramanových zložiek je závislý len na teplote a útlmoch spätnej cesty v testovanom vlákne. Snímanú teplotu je potom možné vyjadriť vzťahom: 3.10

$$\frac{1}{T(z)} = \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{S_{LE}} \left(\ln(\bar{R}(z)) + \int_{z_{ref}}^z (\alpha_{as}(u) - \alpha_s(u))du \right) \quad (3.10)$$

Pri meraní pomocou Ramanovho rozptylu je potrebné zvoliť správnu vlnovú dĺžku vstupného impulzu ako aj typ vlákna. Pri voľbe jednovidového alebo mnohovidového vlákna je potrebné zvážiť dĺžku vlákna a použitú vlnovú dĺžku. Je potrebné brať do úvahy disperziu vlákna, čo môže ovplyvniť šírku pásma rozšírením vstupného impulzu a tým sa zníži priestorové rozlíšenie. U mnohovidových vlákien ide o vidovú disperziu a u jednovidových vlákien chromatickú disperziu. Na obrázku 3.4 je zobrazená intenzita anti-Stokesovej zložky ako funkcia vzdialenosti pri rôznych

vlnových dĺžkach. Z obrázka sa dá vyčítať, že pre vlákna kratšie ako 2,2 km je výhodnejšie použiť vlnovú dĺžku 850 nm alebo 904 nm, do 4,2 km vlnovú dĺžku 1064 nm do 8,6 km 1300 nm a nad 8,6 km 1550 nm. Obrázok je zjednodušený a nebrali sa do úvahy efekty ako možnosť použitia výkonného zdroja pri každej vlnovej dĺžke, citlivosť detektorov na jednotlivé vlnové dĺžky, maximálny výkon, ktorý môže byť použitý, straty spôsobené vláknom.[18]



Obr. 3.4: Intenzita anti–Stokesovej zložky ako funkcia vzdialenosti pre typické mnohovidové vlákno s plynulou zmenou indexu lomu pri rôznych vlnových dĺžkach [18]

3.2.3 OTDR s využitím Brillouinovho rozptylu

Pri senzoroch využívajúce Brillouinov rozptyl sa sníma posun medzi vlnovými dĺžkami vyslaného signálu a Brillouinovho rozptylu. Bežne sa meria frekvenčný posun, namiesto posunu medzi vlnovými dĺžkami, pretože umožňuje zápis, ktorý je ľahšie spracovateľný s požadovaným rozlíšením. Pre vlákna so skokovou zmenou indexu lomu je možné tento posun vypočítať pomocou rovnice 3.11

$$\nu_{SBS} = 2 \frac{nV_A}{\lambda_L} \quad (3.11)$$

kde ν_{SBS} je Brillouinov frekvenčný posun, n je index lomu vlákna, V_A je rýchlosť akustickej vlny vo vlákne, λ_L vlnová dĺžka vstupného impulzu.[20]

Dôležité je, že frekvenčný posun je závislý na vlnovej dĺžke vstupného impulzu a preto je to potreba brať do úvahy pri porovnávaní rôznych meraní s rôznymi zariadeniami alebo pri vymenení snímacieho zariadenia. Väčšina optických vlákien sú dopované Germániom, čo určuje vlastnosti vlnovodu. Zvýšením obsahu Germánia v jadre vlákna sa zníži rýchlosť akustickej vlny a v dôsledku toho aj Brillouinov

frekvenčný posun. U bežných telekomunikačných vlákien sa pohybuje obsah Germánia okolo 3% z váhy vlákna a Brillouinov frekvenčný posun okolo 10,845 GHz. Pri špeciálnych vláknach môže byť obsah Germánia až 20 %. To však výrazne zníži Brillouinov frekvenčný posun a to pri niektorých snímacích zariadeniach môže byť nižší ako snímaný frekvenčný rozsah.[20]

Spektrum Brillouinovho rozptylu u niektorých jednovidových vláknach, ktoré majú upravenú disperznú charakteristiku a straty pri ohyboch vlákna, môže mať jeden a viac vrcholov.[18] Následkom šumu merania môže dôjsť k nepresnému určeniu vrcholu spektra a tým k takzvaným „skokovým chybám“, pretože určená teplota je vypočítaná podľa nesprávneho vrcholu frekvenčného posunu. Je možné využiť algoritmus, ktorý určí vrchol medzi dvoma vrcholmi, to zníži „skokovú chybu“, avšak vytvorí takzvanú „chybu posunu“ skutočného vrcholu. Kvôli tomu sa zvyknú používať senzorické vlákna s jedným vrcholom spektra Brillouinovho rozptylu. V prípade vlákien s viac vrcholmi je potrebné aby bol druhý a ďalšie vrcholy minimálne 5 dB slabšie ako hlavný vrchol.[20]

Ako je už spomínané, zmena frekvenčného posunu $\Delta\nu_{SBS}$ závisí na zmene teploty ΔT a zmeny pozdĺžneho predĺženia $\Delta\varepsilon$. Potom je možné zapísať vzťah:3.12

$$\Delta\nu_{SBS} = C_\varepsilon\Delta\varepsilon + C_T\Delta T \quad (3.12)$$

kde C_ε a C_T sú koeficienty predĺženia a teploty konkrétneho vlákna a $\Delta\varepsilon$ a ΔT je zmena predĺženia a zmena teploty.[21]

Pri využití Brillouinovho rozptylu je viac systémov jeho využitia, ktoré sú popísané nižšie. Ide o Brillouinovú optický reflektometer v časovej oblasti – BOTDR a Brillouinovú analýzu v časovej oblasti – BOTDA.

BOTDR – Brillouin optical time-domain reflectometer

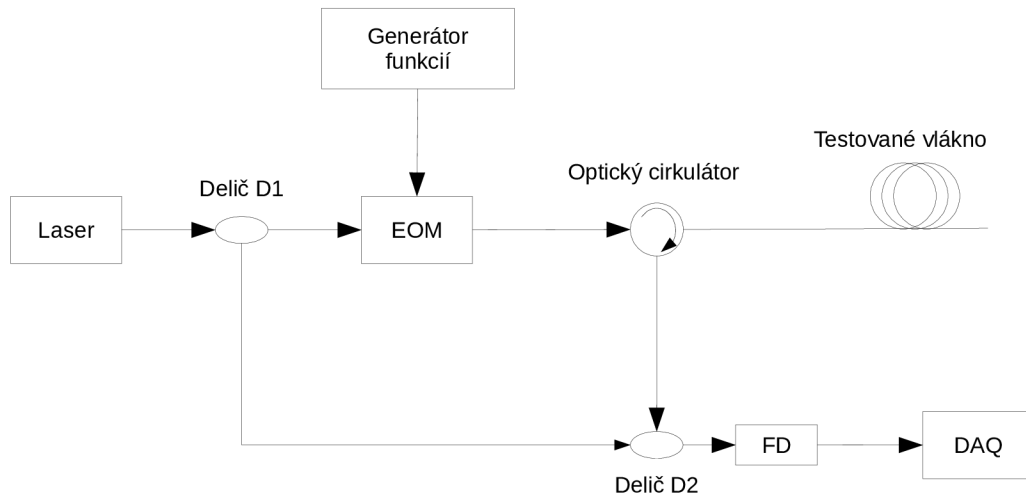
BOTDR je založený na snímaní spontánneho Brillouinovho rozptylu. Jeho výhodou je, že postačuje prístup iba k jednému koncu snímacieho vlákna. Pri metóde BOTDR sa používajú dve techniky detekcie: priama detekcia alebo zmiešavacia (heterodýnna) detekcia.

Pri priamej detekcii sa Brillouinov signál musí opticky oddeliť od Rayleighovho signálu inak by sa mohlo stať, že detektor zachytí Rayleighov signál, ktorý je výrazne silnejší ako Brillouinov signál. Oddelenie signálov je možné docieľiť použitím Fabry–Pérotovho alebo Mach–Zehnderovho interferometru, prípadne Braggovskou mriežkou s nízkou šírkou pásma, keďže Brillouinov frekvenčný posun je relatívne malý (~ 11 GHz).

Pri zmiešanej detekcii časť vstupného svetla s úzkou šírkou pásma je použitá ako referenčný signál (lokálny oscilátor – LO), ktorý umožňuje elektrický výber Brillouinovho signálu.

lounovho signálu. Táto technika využíva zmiešanie spätne rozptýleného signálu a referenčného signálu. Výsledkom toho je nižšia šírka pásma detekovania v porovnaní s priamou detekciou, avšak vykazuje väčší rozsah merania a lepšiu presnosť oproti priamej detekcii.[15]

Na obrázku 3.5 je zobrazená konfigurácia BOTDR s využitím zmiešanej detekcie.



Obr. 3.5: Princíp BOTDR [15]

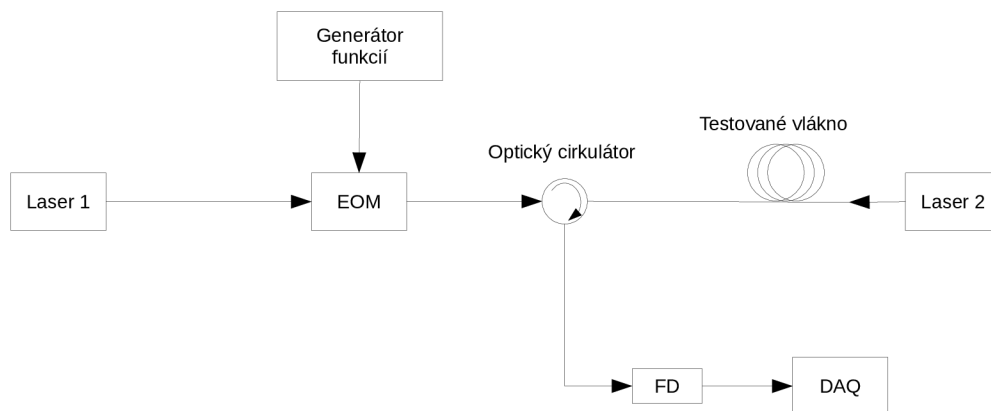
Zdrojom svetla s úzkou šírkou pásma je laser so spojitou vlnou, ktorá je v deliči C1 rozdelená na dve cesty. Hornou cestou sa prenáša väčšina výkonu, ktorý je modulovaný elektro-optickým modulátorom (EOM) na sériu impulzov. Spodná cesta je využitá ako generátor referenčného signálu LO. Impulzy prechádzajú cez optický cirkulátor do testovaného optického vlákna. Spätne rozptýlený signál je prenesený ďalším portom optického cirkulátora na delič C2, kde sa zmieša s referenčným signálom LO. Kombinácia týchto signálov je zachytená fotodetektorom a analyzovaná DAQ systémom (systém na získanie údajov).[15]

BOTDA – Brillouin optical time-domain analysis

BOTDA je založená na stimulovanom Brillouinovom rozptyle – SBS. BOTDA využíva spojitý laser šíriaci sa v opačnom smere, ktorý je naviazaný na druhý koniec testovaného vlákna. Preto je potrebný prístup k obojom koncom vlákna, nevýhoda oproti BOTDR.[15]

Na obrázku 3.6 je znázornená konfigurácia BOTDA. Vstupný signál z Lasera 1 je modulovaný pomocou EOM na impulzy a je naviazaný do testovaného vlákna cez optický cirkulátor. Súčasne je na druhý koniec vlákna naviazaný spojitý signál

z Lasera 2 v opačnom smere oproti signálu z Lasera 1. Pred výstup laserov je umiestnený optický izolátor, aby nedošlo k odrazom optického signálu do laserov a tým zabezpečujú stabilitu laserov. [15] Rozdiel frekvencií medzi zdrojmi týchto signálov je kontrolovaný aby bol rovnaký ako Brillouinov frekvenčný posun Brillouinvo rozptylu. Potom dochádza k interakcii medzi Brillouinovým rozptylom a spojitým signálom zo zdroja. [5] Signál SBS je cez cirkulátor privedený na fotodiódu a spracovaný DAQ systémom. Je potrebné zabezpečiť aby oba zdroje boli stabilné, pretože každá odchýlka frekvencie znižuje účinnosť systému.



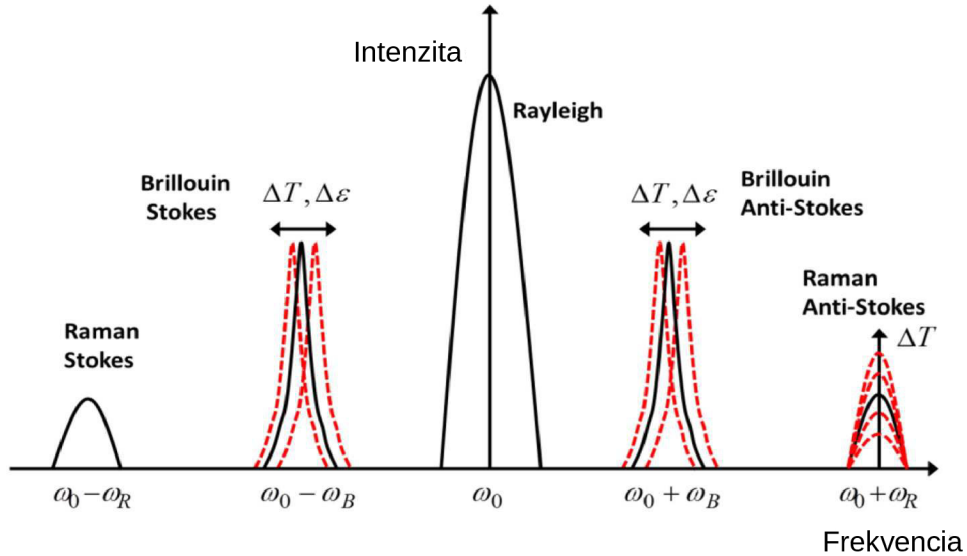
Obr. 3.6: Princíp BOTDA [15]

3.3 Parametre metód distribuovaných teplotných senzorov – DTS

Vyššie spomínané metódy využívajú rôzne rozptyly svetla, a preto majú rôzne vlastnosti. Všetky rozptyly majú rôzne veľkú silu signálu, čo je dôležité pri ich detekovaní. Na obrázku 3.7 je zobrazená intenzita signálov Rayleighovho, Brillouinovho a Ramanovho rozptylu. Z obrázka je jasné, že najsilnejší signál má Rayleighov rozptyl, potom Brillouinov a na koniec Ramanov rozptyl.

3.3.1 Porovnanie metód DTS

Metóda C-OTDR využíva Rayleighov rozptyl, a preto je pomocou tejto metódy možné dosiahnuť vysokej presnosti aj na veľkú vzdialenosť. Problémom u tejto metódy je spôsob akým sa dosiahne frekvenčný posun. Kvôli nejednotnému rozdeleniu predĺženia alebo teploty v rámci priestorového rozlíšenia vedie k nízkym hodnotám



Obr. 3.7: Rozptyly v optickom vlákne [21]

korelácie, pretože sa vytvára viac vrcholov v spektre. Následkom toho je ťažšie určenie hodnoty frekvenčného posunu. Ak sa vlákno predĺži viac ako je priestorové rozlíšenie, tak nie je možné nájsť žiadnu koreláciu pri porovnaní spektier na rôznych miestach. [23]

U metódy OTDR s využitím Ramanovho rozptylu je najväčšou výhodou citlivosť iba na teplotu a možnosť použiť jednoivodové a mnohovidové vlákna. Avšak ako je vidno na obrázku 4.1 signál Ramanovho rozptylu je najslabší, a preto je potreba vysokocitlivý detektor a dlhší čas merania (10 minút). [24] Táto metóda má obmedzenie v praxi merať teplotu počas dlhej časovej periódy len do 300 °C. [25]

U metódy OTDR s využitím Brillouinovho rozptylu sú dve základné možnosti BOTDR a BOTDA, ktorých vlastnosti sa líšia. BOTDR potrebuje prístup iba k jednému koncu vlákna, tak ako to je u metód uvedených vyššie. BOTDA potrebuje prístup k oboom koncom vlákna. To však spresňuje meranie a rýchlosť získania údajov. Nevýhodou je väčšia náchylnosť k poruchám vlákna v drsných podmienkach. [26] Využitím metódy s Brillouinovým rozptylom (BOTDA) je možné dosiahnuť lepšieho priestorového rozlíšenia oproti metóde C-OTDR s menšou presnosťou merania. [27]

3.3.2 Komerečne dostupné zariadenia

V súčasnosti sú dostupné komerčné systémy na meranie teploty. Niektoré z nich sú uvedené nižšie. U každého je uvedená metóda a parametre merania uvádzané výrobcom.

Firma **OZ Optics** ponúka produkt OZ Optics ForeSight, ktorý má rôzne moduly. Tu sú uvedené dva z nich: modul BOTDR a modul BOTDA+BOTDR Combo.

- Modul BOTDR je určený k meraniu teploty a predĺženia vlákna. Využíva metódu BOTDR. Stačí prístup k jednému koncu vlákna a dĺžka vlákna je maximálne 70 km počas, ktorého je uskutočniteľné meranie s priestorovým rozlíšením 1 - 80 m. Podľa materiálu vlákna je možné merať teplotu v rozsahu -100 °C až $+500\text{ °C}$ a dosiahnuť presnosť $\pm 0,8\text{ °C}$ až $\pm 2\text{ °C}$, záleží od dĺžky meraného vlákna. Využíva sa laser s vlnovou dĺžkou 1550 nm a je možnosť pripojenia jednovidových vlákien.[28]
- Modul BOTDA+BOTDR Combo je určený k meraniu teploty a predĺženia vlákna. Používa sa metóda BOTDA alebo BOTDR. Pre metódu BOTDR platia rovnaké parametre ako sú vedené pri samostatnom module BOTDR. Metóda BOTDA využíva slučkové zapojenie a preto je potreba zabezpečiť prístup k obidvom koncom vlákna. Dĺžka meraného vlákna môže dosahovať až 160 km a priestorové rozlíšenie od 0,1 m až 50 m. Podľa materiálu vlákna je možné merať teplotu v rozsahu -270 °C až $+2100\text{ °C}$ a dosiahnuť presnosť $\pm 0,1\text{ °C}$ až $\pm 0,4\text{ °C}$ v závislosti na dĺžke vlákna. Tento modul je schopný merať súčasne teplotu aj predĺženie vlákna pre 50 km vlákna s presnosťou $\pm 0,1\text{ °C}$. Rovnako ako pre modul BOTDR platí, že sa využíva laser s vlnovou dĺžkou 1550 nm a jednovidové vlákna.[29]

Firma **Yokogawa** ponúka dva zariadenia na meranie teploty: DTSX200 a DTSX3000. Oba zariadenia využívajú princíp Ramanovho rozptylu.

- DTSX200 je navrhnutý na meranie vlákna s dĺžkou do 6 km s priestorovým rozlíšením 1 m. Rozsah teplôt, ktoré je možné merať je -200 °C až $+300\text{ °C}$. Podľa dĺžky času merania je možné dosiahnuť rôzneho teplotného rozlíšenia. Pre meranie s dĺžkou trvania 10 minút sa udáva teplotné rozlíšenie $0,1\text{ °C}$ až $0,7\text{ °C}$ podľa dĺžky vlákna. Je možné využiť mnohovidové vlákno s plynulou zmenou indexu lomu ($50/125\mu\text{m}$) [30]
- DTSX3000 je navrhnutý na meranie vlákna s dĺžkou do 50 km a priestorové rozlíšenie sa udáva 1 m alebo menej. Rozsah teplôt je rovnaký ako u zariadenia DTSX200 -200 °C až $+300\text{ °C}$. Pri 10 minútovom meraní sa dosahuje teplotného rozlíšenia typicky $0,02\text{ °C}$ až $1,6\text{ °C}$ podľa dĺžky vlákna. Rovnako je možné využiť mnohovidové vlákno s plynulou zmenou indexu lomu ($50/125\mu\text{m}$) [31]

Firma **Canada Huiangu Technology** má na trhu 3 zariadenia na meranie teploty. Zariadenie DTS-SM30K dokáže merať teplotu s využitím Ramanovho rozptylu a zariadenia HDTSS-SM50K a HDTSS-SM20K, ktoré využívajú Brillouinov rozptyl (BOTDA) sú určené na meranie teploty a predĺženia vlákna.

- Ako už bolo spomenuté DTS-SM30K využíva Ramanov rozptyl. Je možné využitie jednovidových vlákien na vzdialenosť 30 km alebo mnohovidových

vlákien na vzdialenosť 20 km. Priestorové rozlíšenie sa udáva 1 m. Merací rozsah teploty ani presnosť není uvedená.[32]

- Model HDTSS-SM50K je určený na väčšie vzdialenosti 50 km a 100 km slučky. Priestorové rozlíšenie je 1 m u 50km a 2 m u 100km. Je možné merať predĺženie alebo teplotu a to v rozsahu -30 °C až $+120\text{ °C}$ s presnosťou 1 °C . [33]
- HDTSS-SM20K má možnosť merať trasu 2 km, 5 km a 20 km, tomu odpovedá priestorové rozlíšenie 2 cm, 5 cm, 20 cm. Rovnako ako predošlý model, rozsah meranej teploty je od -30 °C do $+120\text{ °C}$ a to s presnosťou 1 °C . Meranie predĺženia je taktiež možné. [34]

Firma **Silixa** ponúka dva zariadenia, ktoré využívajú Ramanov rozptyl. Ide o zariadenia ULTIMA DTS a XT-DTS. ULTIMA DTS je schopná merať teplotu až do 35 km vlákna. Teplotná rozlišovacia schopnosť je $0,01\text{ °C}$ a priestorová rozlišovacia schopnosť 25 cm. Využívajú sa mnohovidové vlákna $50/125\mu\text{m}$. Rozsah teploty, ktorú je možné merať nie je uvedený. XT-DTS má podobné vlastnosti ako ULTIMA, avšak je možné merať iba vlákno s dĺžkou 10 km. [35]

Neubrescope NBX-7031 od firmy **Neubrex** má možnosť využiť metódy PPP-BOTDA (Pulse-Prepump BOTDA) alebo TW-COTDR (Tunable wavelength - COTDR). Pre obe metódy je merací dosah 27 km a schopnosť merania teploty aj predĺženie vlákna. U metódy PPP-BOTDA sa uvádza priestorové rozlíšenie od 2 cm do 50 cm a presnosť merania $0,75\text{ °C}$. U metódy TW-COTDR sa uvádza priestorové rozlíšenie od 2 cm do 20 cm a presnosť $0,001\text{ °C}$. Pri možnosti súčasného merania predĺženia a teploty je presnosť teploty $0,5\text{ °C}$. Zariadenie je navrhnuté na použitie jednovidových vlákien. [36]

Od firmy **Bandweaver** sú v ponuke T-Laser DTS a FireLaser DTS. Oba využívajú Ramanov rozptyl.

- T-Laser je možné využiť pri meraní na vzdialenosť 40km s presnosťou ± 1 až 2 °C a vzorkové rozlíšenie sa udáva 1 až 2 m v závislosti na dĺžke vlákna. Pri maximálnej dĺžke vlákna meranie trvá viac než 4 minúty. Merací rozsah teploty je -60 až $+85\text{ °C}$ pri štandardných vláknach, pri špeciálnych vláknach je to -60 až $+150\text{ °C}$. Využívajú sa mnohovidové vlákna ($50/125\mu\text{m}$) a je možné použiť vlnovú dĺžku 850/1300 nm. [37]
- FireLaser sa využíva na meranie vlákna s dĺžkou do 10 km s rozlíšením teploty lepším ako 1 °C a vzorkové rozlíšenie je 1 m. Podobne ako u predošlého zariadenia je merací rozsah teploty rovnaký a je použitá rovnaká vlnová dĺžka, avšak FireLaser používa mnohovidové vlákno s iným priemerom ($62,5/125\mu\text{m}$). [38]

Firma **NKT Photonics** ponúka zariadenie LIOS EN.SURE vo viacerých modeloch. Nižšie je popísaný model pre dlhšie vzdialenosti EN.SURE OTS4. Je schopný merať vlákna dlhé až 80 km s využitím BOTDR. Využíva jednovidové vlákna a vlnová dĺžka lasera je 1550 nm. Na základe vzdialenosti je možné priestorové rozlíšenie

1 až 10 m. Presnosť merania dosahuje ± 2 °C a dĺžka merania je 1 - 30 minút. [39]

3.3.3 Výskum a rozvoj DTS

Kvôli zvyšujúcemu dopytu po bezpečnosti práce, aplikácií v ropnom a plynárenskom priemysle prostredníctvom DTS sa kladie dôraz na vylepšenie parametrov DTS. Predpokladá sa hlavne rozvíjanie hybridných DTS na meranie teploty, zvuku, vibrácií a predĺženia v jednom vlákne.[40]

Vývoj je zameraný na komponenty potrebné pre distribuované teplotné senzory ako sú: lasere, prijímače, elektrooptické moduly a optické vlákna. Za posledné roky sa výrazne zlepšil pomer cena/výkon týchto komponentov. Výrobou špeciálnych vlákien sa zlepšujú koeficienty rozptylu pri zachovaní nízkeho útlmu a kompatibility so štandardnými vláknami. Keďže distribuované teplotné senzory sú používané v drsných podmienkach je dôležité sa zaujímať aj o ich životnosť.[15]

Štúdie zaoberajúce sa zlepšením parametrov DTS

V súčasnosti je množstvo štúdií, ktoré sa zaoberajú distribuovanými teplotnými optickými senzormi. Nižšie sú uvedené niektoré z nich.

Štúdia [41] sa zaoberala pomerom signál/šum pri dynamickom meraní teploty a predĺženia pri metódach BOTDA a COTDR. Pri dynamickom meraní je dôležitý čas merania respektíve počet priemerov merania. Navrhuje sa použiť algoritmus, ktorý zistí minimálny počet potrebných priemerov, pri ktorých je možné dosiahnuť stabilného výsledku oproti použitiu fixného počtu. Zistilo sa, že šírka pásma lasera a teplotný šum prijímača sú dominantnejšie ako šum relatívnej intenzity lasera pre oba systémy (BOTDA, COTDR). Zníženie šírky pásma lasera je dôležitejšie pre BOTDA ako pre COTDR. Pri vhodnom výbere komponentov je možné získať vyšší pomer signál/šum a tým pádom znížiť počet priemerovania, čím sa získa rýchlejšie získavanie údajov vhodné pre dynamické snímanie.

Ako je už spomínané vyššie, pomocou Ramanovho rozptylu je počas dlhej časovej periódy možné merať do určitých teplôt (300°C). Rôzne štúdie sa zaoberajú zvýšením teploty, ktorú by bolo možné merať. V štúdiu [25] sú testované optické vlákna s rôznymi plášťami. Cieľom bolo zistiť presnosť a spoľahlivosť merania teploty do 450 °C v drsných podmienkach počas dlhej časovej periódy pomocou Ramanovej OTDR. Bolo použité mnohovidové vlákno s postupnou zmenou indexu lomu s jadrom z čistého oxidu kremičitého a ako plášť boli použité 4 rôzne materiály: uhlík a polyimid, meď, hliník a zlato. Vlákna s medeným a uhlíkovým/polyimidovým plášťom mali relatívne malú chybu merania, avšak vlákna s hliníkovým a zlatým plášťom vykazovali obrovskú chybu. Zníženie tejto chyby je možné dynamickou kalibráciou, ktorá by kompenzovala zmeny v hodnote akumuláčného diferenciálneho

útlmu. Najvhodnejšími z testovaných vlákien so špeciálnym plášťom sú vlákna s me-
deným a uhlíkovým/polyimidovým plášťom. Nevýhodou medi je však oxidácia pri
vysokých teplotách.

Zlepšenie presnosti merania je možné dosiahnuť pomocou algoritmu dynamickej
optickej kompenzácie rozdielov, ktorým je možné eliminovať nestabilitu optického
výkonu zdroja. V prípade využitia iba anti-Stokesovej zložky Ramanovho rozptylu
je lepší pomer signál/šum oproti pomeru Stokesovej a anti-Stokesovej zložky. Avšak
to sa dá využiť iba za predpokladu, že optický výkon a útlm vlákna je konštantný
počas merania. V praxi je veľa vplyvov, ktoré spôsobia, že optický výkon nie je
konštantný a preto sa využíva algoritmus dynamickej optickej kompenzácie rozdie-
lov. V [42] je navrhnutá metóda založená na sekcii kompenzačného vlákna s dĺžkou
30 m a vo vzdialenosti 200 m od začiatku snímaného vlákna, ktorá je umiestnená
do termostatického kúpeľa s referenčnou teplotou na vykompenzovania nestability
optického výkonu. Ak sa predpokladá, že bod L_0 sa nachádza na kompenzačnom
vlákne a pretože časový interval získavania signálu medzi bodom L_0 a L ($L_0 < L$)
je krátky, môže byť považovaný optický výkon konštantný počas získavania signálu.
Meranie prebiehalo na 25 km vlákne a v troch miestach (1,14 km, 9,6 km a 18,27
km) vlákna bolo zvýšenie teploty o 10 °C v rozsahu 38 °C až 88°C. Pomocou kom-
penzácie optického výkonu bola zvýšená presnosť z 9,2 °C na 1,1°C a 7,0°C na 1,9°C
vo vzdialenosti 9,6 km respektíve 18,27 km.

4 VIAVI Solutions

VIAVI Solutions je technologická spoločnosť so sídlom v San Jose v Kalifornii. Ponúkajú rôzne možnosti sieťových a servisných produktov a optických bezpečnostných výkonových produktov a riešení. Umožňuje IT poskytovateľom riadiť siete pomocou zariadení, systémov a technológií. Poskytuje zariadenia a technológie na meranie a testovanie vlákien, káblov a prístupu k zariadeniam. [43]

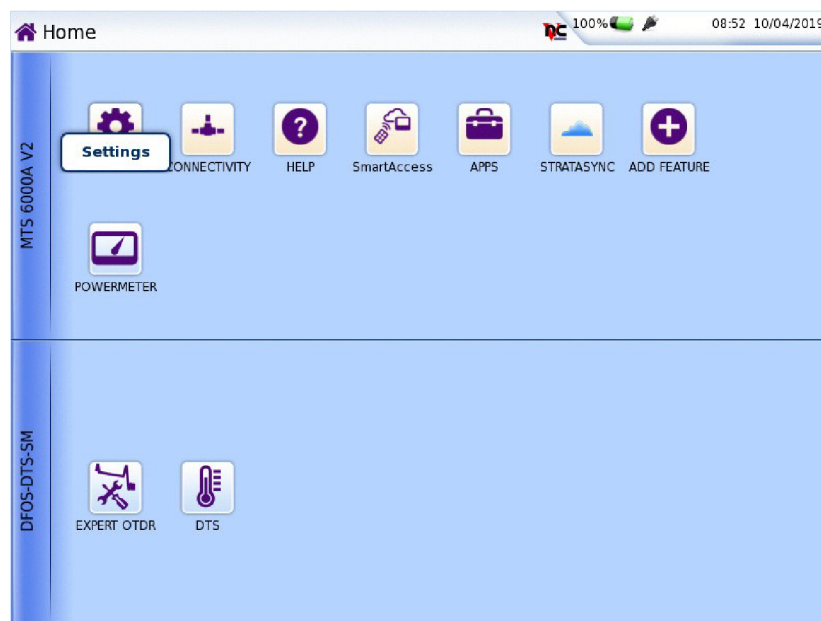
4.1 VIAVI MTS 6000A

V práci je použité zariadenie VIAVI MTS 6000A 4.1 s DTS modulom od spoločnosti VIAVI Solutions. Pomocou tohto zariadenia je možné merať v módoch OTDR a DTS. V práci sú využívané oba módy. OTDR na zistenie reálnej trasy a presné určenie spojok a dĺžky vlákna. DTS na zistenie zmien teploty na vlákne. OTDR využíva Rayleighov rozptyl, ktorý je popísaný v kapitole Parametre optických vlákien. V prípade DTS je využívaný Ramanov rozptyl. Jeho využitie pri meraní teploty je popísané v kapitole Metódy merania teploty distribuovaných OVS. Pre OTDR sú výrobcom udávané nasledujúce parametre: možnosť využiť vlnové dĺžky 1550 nm a 1650 nm, rozsah vzdialenosti do 160 km, šírka impulzu 5ns až 1 μ s. Pre DTS sú výrobcom udávané tieto parametre: rozsah vzdialenosti do 80 km, čas merania od 15 sekúnd do 5 hodín, priestorové rozlíšenie 0,5 - 30 metrov, možnosť merať teploty od -200°C do 700°C v závislosti od použitého vlákna, chyba merania teploty 0,5 °C. [44]

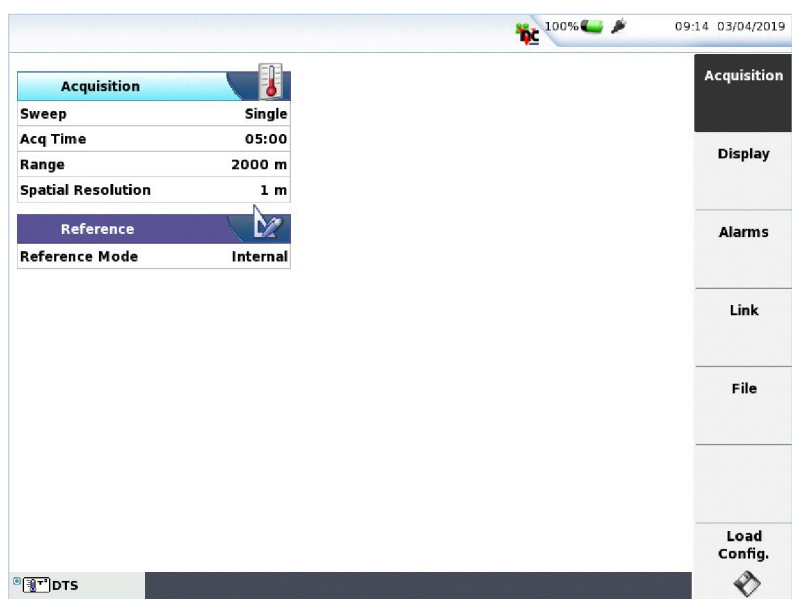


Obr. 4.1: VIAVI MTS 6000a [45]

VIAVI MTS 6000A má intuitívne ovládanie. Z hlavného menu, kde je možné sa dostať tlačítkom „Home“ 4.2 je potrebné vybrať mód, ktorý sa ide používať OTDR/DTS, respektíve je možné vybrať obidva módy. Následne tlačítkom „Setup“ sa zobrazí okno pre nastavenie parametrov merania 4.3. V tomto okne je najdôležitejšou časťou časť „Acquisition (Získ údajov)“, kde je možné nastaviť druh merania (jednorázové/priebehové), čas merania, dĺžka kábla, priestorové rozlíšenia a referencia. V ďalších častiach „Display“, „Alarms“, „Link“, „File“ je možné nastaviť parametre zobrazenia výsledkov, nastaviť alarm v prípade prekročenia nastavenej teploty, nastavenie identifikátoru kábla a podobne a miesto uloženia výsledkov. Z začať meranie je možné tlačítkom „Start/Stop“ a v prípade prezerania výsledkov tlačítkom „Results“.[44]



Obr. 4.2: VIAVI MTS 6000a hlavné menu [44]



Obr. 4.3: VIAVI MTS 6000a nastavenie parametrov [44]

5 Meranie s VIAVI MTS 6000A

U všetkých meraní v tejto kapitole je použité zariadenie VIAVI MTS 6000A. Bolo spravené 1 referenčné merania na zapojení v laboratóriu, kde bola využitá teplotná komora. Ďalšie merania boli realizované na zapojení, ktoré bolo v centre AdMaSu - Vysokého učení technického v Brně a pri tomto zapojení išlo o simuláciu úniku odpadových vôd z potrubia. Pre všetky merania (ak nie je uvedené inak) boli použité nasledujúce nastavenia prístroja: vlnová dĺžka použitého lasera bola pre presnejšie meranie 1550 a 1650 nm, priestorové rozlíšenie 1 m (šírka impulzu 10 ns), čas merania 5 minút a externá sonda pre referenčnú teplotu. Rozsah vzdialenosti sa menil podľa zapojenia (zapojenie v laboratórnych podmienkach a zapojenie v centre AdMaSu - Vysokého učení technického v Brně). Pre spracovanie výsledkov bol použitý program MATLAB. V prvom rade bolo potrebné načítať dáta z prístroja VIAVI a zapísať ich do premenných s ktorými bolo možné ďalej pracovať, čo bolo realizované kódom:

```
theFiles = dir('* .txt');
pocet = length(theFiles);
for k~= 1 : pocet
    nazov = theFiles(k).name;
    D = importdata(nazov);
    udaje = D.data;
vzdialenost(:,k) = udaje(:,2);
teplota(:,k) = udaje(:,6);
end
```

Takýmto spôsobom je zaistené, že všetky dáta z textových súborov v danom adresári sú postupne nainportované a údaje o vzdialenosti a teplote uložené do premenných „vzdialenost“ a „teplota“.

Pomocou kódu zobrazeného nižšie bolo odrezanie nepotrebných dát (šumu za koncom vlákna) pre lepšie zobrazenie v grafe.

```
for a = 1:size(vzdialenost,1)
    for a1 = 1:size(vzdialenost,2)
        if vzdialenost(a,a1)>0 && vzdialenost(a,a1)<735
            z(a,a1) = vzdialenost(a,a1);
            y(a,a1) = teplota(a,a1);
        end
    end
end
end
```

Pri niektorých meraniach bolo nutné vyrovnať offset výkonovej úrovne a tým zaistiť rovnakú výkonovú úroveň medzi meraniami. Táto operácia bola realizovaná kódom:

```
pocetv = size(vzdialenost,2);

for c = 1:pocetv
    rozdiel(:,c) = y(:,1) - y(:,c);
end

for d = 1:pocetv
    priemer(1,d) = mean(rozdiel(:,d));
end

for e = 1:pocetv
    y(:,e) = y(:,e)+priemer(:,e);
end
```

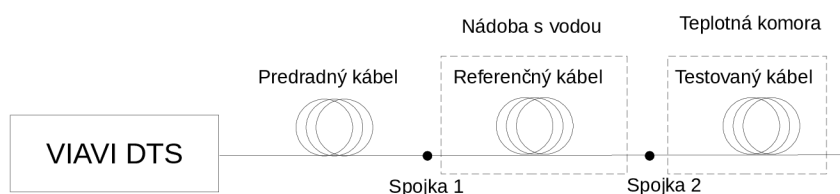
V prvom for cykle je vypočítaný rozdiel medzi dvomi teplotami, z ktorého je vypočítaný priemer v druhom cykle for. Posledný for cyklus slúži na pripočítanie priemeru k danej teplote, čím sa dosiahlo vyrovnanie odchýlky teploty spôsobenou nestabilitou výkonovej úrovne. Následne bolo možné vykresliť výsledky do grafu. Vykreslenie grafu bolo realizované kódom:

```
f1 = figure;
figure(f1);
plot(vzdialenost(1,1:pocet),teplota(1,1:pocet))
legend('ref.bod1', 'ref.bod2', 'ref.bod3', 'Location','northwest');
xlabel('Vzdialenost (m)');
ylabel('Teplota (°C)');
grid on;
```

Takýmto spôsobom je vytvorený 2D graf „Figure1“, kde sú zobrazené grafy vytvorené z údajov zo všetkých súborov importovaných do programu MATLAB. Pomocou príkazov „xlabel“ a „ylabel“ sú pomenované osi grafu. Príkazom „legend“ je zobrazená legenda grafu, ktorá sa dá umiestniť podľa požiadaviek aby nezakrývala dôležité časti grafu. Príkaz „grid on“ slúži na zobrazenie mriežky grafu.

5.1 Referenčné meranie v laboratórnych podmienkach s teplotnou komorou

Jedno z referenčných meraní bolo uskutočnené v laboratórnych podmienkach a pre zabezpečenie zmeny teploty bola použitá teplotná komora. Schéma zapojenia je zobrazená na obrázku 5.1. Zapojenie pozostávalo z meracieho prístroja VIAVI MTS 6000A, 500 m predradného kábla, 10 m referenčného kábla, z ktorého časť kábla bola ponorená do vody a 10 m testovaného kábla, ktorého časť bola umiestnená v teplotnej komore. Prepojenie medzi káblami bolo uskutočnené spojkami. Veľkosť teplotnej komory bola približne 10x10 cm.



Obr. 5.1: Schéma zapojenia s využitím teplotnej komory

Nastavenie parametrov merania bolo nastavené na meracom prístroji následovne. Bol použitý laser s vlnovou dĺžkou 1550 a 1650 nm s impulzom o dĺžke 10 ns, čo odpovedá priestorovému rozlíšeniu 1 m, čas merania bol nastavený na 5 minút a rozsah vzdialenosti na 650 m. Využitá bola externá sonda na snímanie referenčnej teploty v nádobe s vodou, kde bola umiestnená referenčná cievka 5.2.

Boli uskutočnené dva typy merania: v prvom bolo v teplotnej komore umiestnených 10 cm kábla, v druhom prípade do teplotnej komory bol skrútený približne 1 m kábla. Fyzické zapojenie trasy bolo odmerané pomocou OTDR a je zobrazené na obrázku 5.3, kde sú vyznačené jednotlivé káble.

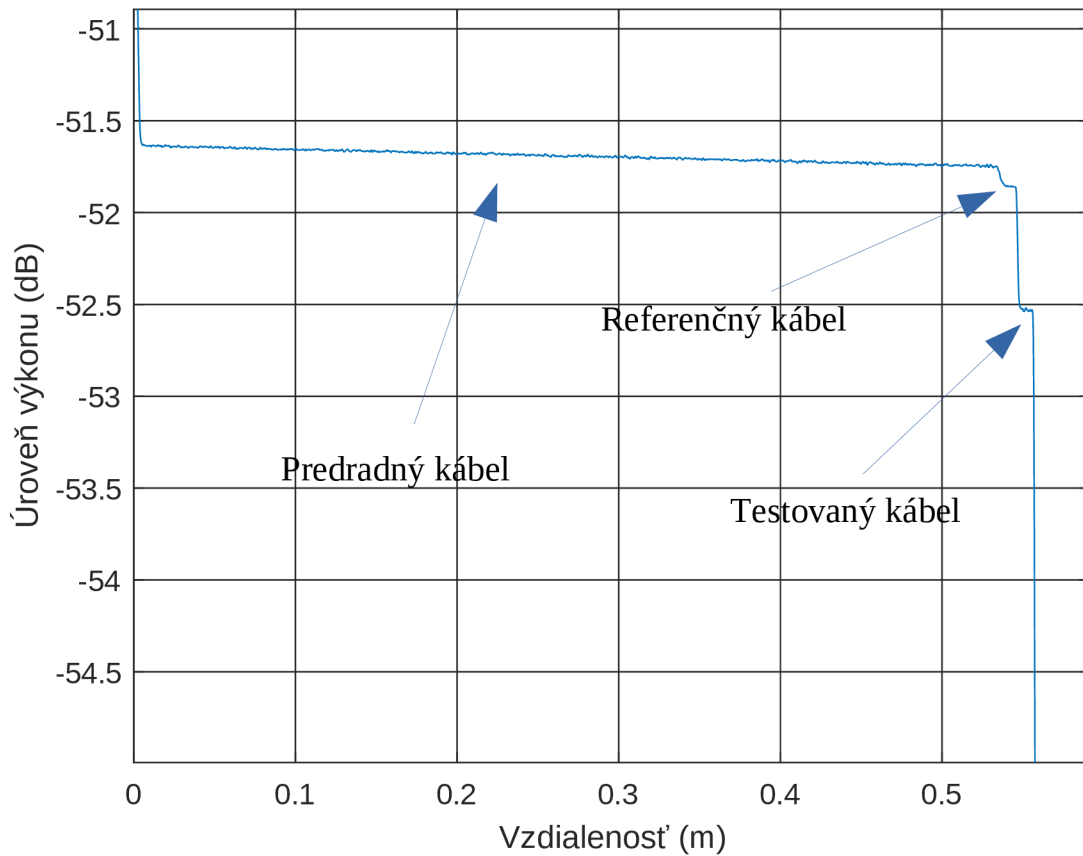
Pre oba typy meraní bolo nastavenie parametrov merania ako je popísané vyššie. Výsledky sú zobrazené v grafe na obrázku 5.4. Z grafu je možné si všimnúť, že meranie je veľmi nepresné a so zvyšujúcou sa teplotou sa výrazne nemení. Táto nepresnosť vznikla tým, že v teplotnej komore bolo len 10 cm kábla, ale priestorové rozlíšenie bolo nastavené na 1 m (šírka impulzu 10 ns). Došlo k spriemerovaniu teploty 10 cm kábla na celý 1 meter. Z tohto dôvodu bol v druhom prípade vložený do teplotnej komory približne 1 m kábla. Následkom čoho sa meranie výrazne spresnilo ako je



Obr. 5.2: Cievka kábla s externou sondou v nádobe s vodou

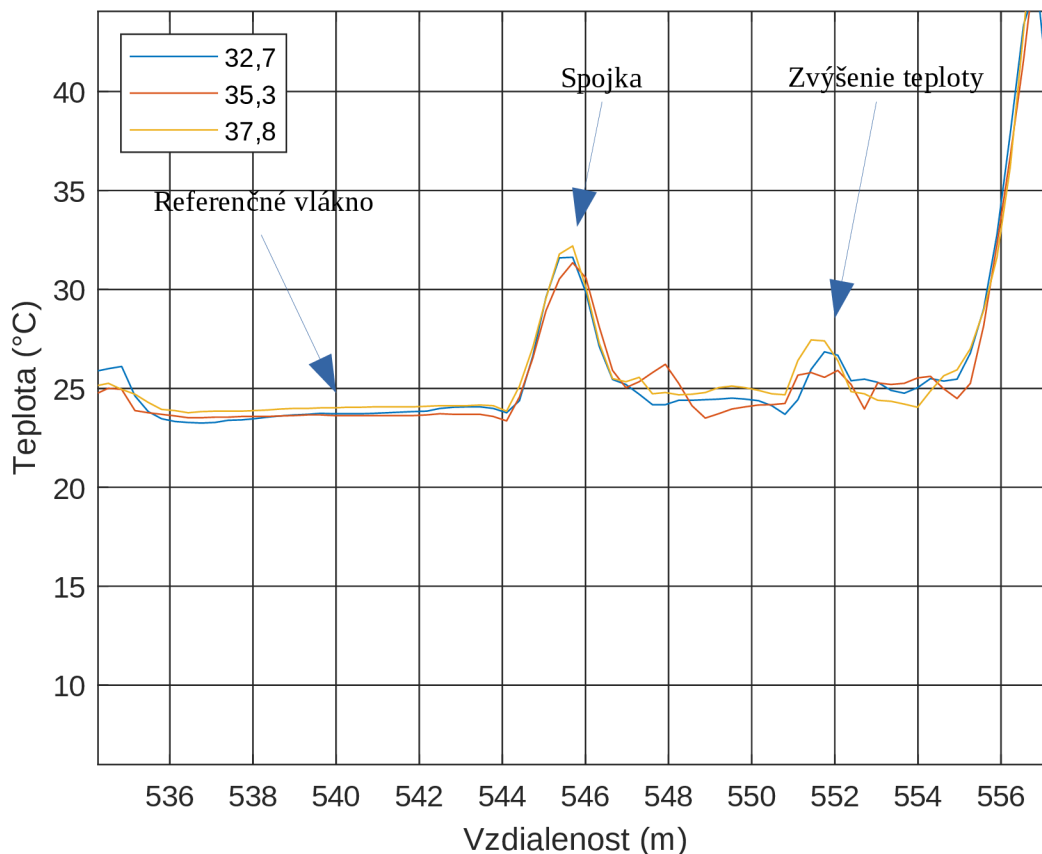
vidno v grafe na obrázku 5.5. Napriek tomu je určenie teploty nepresné približne o jeden stupeň, čo je pravdepodobne spôsobené nestabilitou teploty v teplotnej komore a rozmermi teplotnej komory. Pri zvinutí 1 m kábla do teplotnej komory, časť kábla sa mohla dostať do tesnej blízkosti Peltierovho článku, ktorý zabezpečoval ohrev teplotnej komory a preto je u všetkých meraní nameraná teplota približne o jeden stupeň vyššia.

Pre potvrdenie, že išlo o chybu merania priemerovaním pri rôznom priestorovom rozlíšení boli zrealizované 3 merania pri odlišnom priestorovom rozlíšení (0,5 m, 1 m, 3 m) a pri stálej teplote 37,2 °C (ostatné parametre merania boli rovnaké ako v predošlých prípadoch). Kolísanie teploty spôsobovala iba nestabilita teplotnej komory. V teplotnej komore sa nachádzalo približne 1 m káblu. Výsledky tohto merania sú zobrazené na obrázku 5.6. Je možné si všimnúť, že rozdiel v snímanej



Obr. 5.3: Meranie OTDR zapojenia s teplotnou komorou

teplote pri 3 m priestorovom rozlíšení bola zosnímaná teplota nižšia v porovnaní s reálnou teplotou. Teoreticky by pre priestorové rozlíšenie 0,5m a 1 m mali byť krivky veľmi podobné, avšak pri priestorovom rozlíšení 0,5 m bola zosnímaná teplota vyššia ako reálna teplota. Táto nepresnosť mohla byť zase spôsobená, časťou kábla, ktorá bola príliš blízko zdroja ohrevu teplotnej komory a pri priestorovom rozlíšení 0,5 m bola viac zosnímaná ako pri väčšom priestorovom rozlíšení.

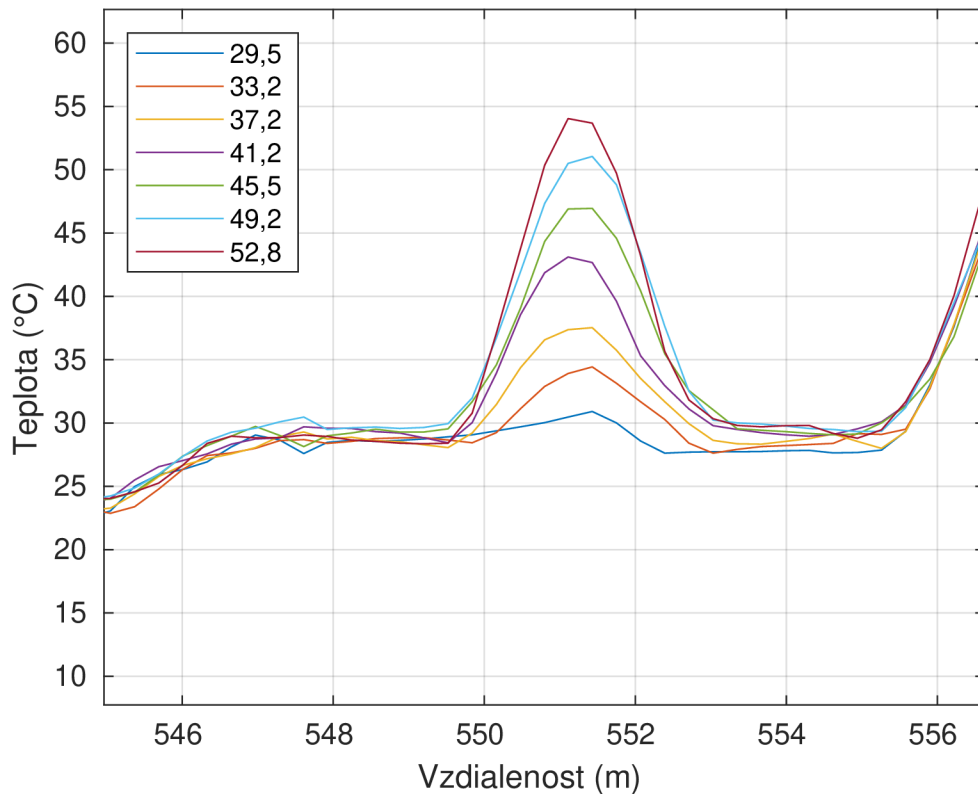


Obr. 5.4: Meranie pri umiestnených 10 cm kábla v teplotnej komore

5.2 Zisťovanie vzdialenosti referenčných bodov zapojenia použitím DTS

Ďalším meraním bolo meranie pri ohreve teplovzdušnou pištoľou. Pri tomto meraní bolo použité zapojenie, ktoré sa nachádzalo v centre AdMaSu - Vysokého učení technického v Brně. Realizácia zapojenia je zobrazená na obrázku 5.7. Išlo o dvojplášťové potrubie pri ktorom bol simulovaný únik medzi plášťami potrubia a neskôr aj únik z vonkajšieho plášťa do piesku. Tieto merania budú popísané v ďalších častiach tejto kapitoly.

Optický kábel bol pripojený pomocou spojky na merací prístroj VIAVI MTS 6000A cez 500 m predradný kábel a do potrubia vstupoval prvým otvorom (na fotke v ľavo). Následne bolo vedené po hornej strane odpadovej trúbky medzi plášťami smerom k druhému otvoru (na fotke v pravo), čo predstavovalo približne 5 m káblu. Na druhej strane bola zvinutá cievka kábla a následne kábel pokračoval späť k prvému otvoru a bol vedený na spodnej strane vonkajšieho plášťa. V prvom otvore bol vyvedený von z potrubia a opäť vedený smerom k druhému otvoru, ale tentokrát po

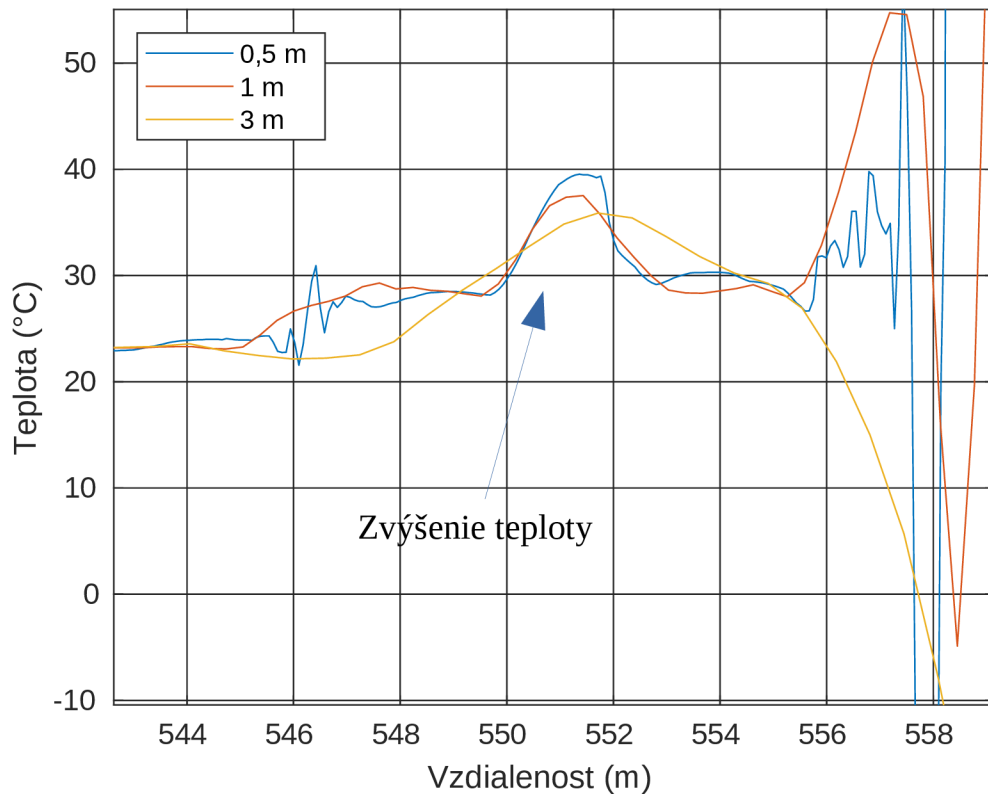


Obr. 5.5: Meranie pri umiestnených 1 m kábľa v teplotnej komore

vonkajšej strane vonkajšieho plášťa cez nádobu s pieskom. Za nádobou z pieskom bol zvyšok kábla navinutý na cievku. Pre presnejšie meranie boli na konci kábla zozvárané dve vlákna, čím sa zdvojila meraná trasa.

Na obrázku 5.8 je zobrazený náčrt zapojenia, kde je červenou farbou vyznačený optický kábel, ktorý bol použitý ako testovaný kábel na meranie teploty. Náčrt je len orientačný pre ilustráciu vedenia kábla v potrubí. Pri ohyboch vlákna nedochádzalo k 90° ohybu kábla.

Pri meraní s použitím teplovzdušnej pištole bolo postupne nahrievaných 5 referenčných bodov. Nastavenie parametrov merania bolo: vlnová dĺžka lasera 1550 a 1650 nm, 10 ns impulz, čo odpovedá 1 m priestorovému rozlíšeniu, dĺžka merania 5 minút a rozsah vzdialenosti 850 m. Teplota, ktorou sa pôsobilo na optický kábel bola 220 °C, avšak ako je vidno na obrázku 5.9 teplota pri meraných bodoch sa nepriblížila teplote 220°C. To bolo spôsobené dĺžkou pôsobenia na vlákno, ktoré sa nestihlo zohriať na danú teplotu a rovnako aj priemerovaním meraní ako to už bolo spomínané vyššie. Pomocou tohto merania bola zistená vzdialenosť týchto bodov a preto presnosť meranej teploty nebola taká dôležitá. Referenčné body sú v schéme zapojenia vyznačené na obrázku 5.10 červenou farbou. Referenčný bod 1 je vo vzdialenosti 541 m, referenčný bod 2 je vo vzdialenosti 546 m, avšak ako je vidno zvýšenie



Obr. 5.6: Meranie pre rôzne priestorové rozlíšenie pri teplote 37,2 °C

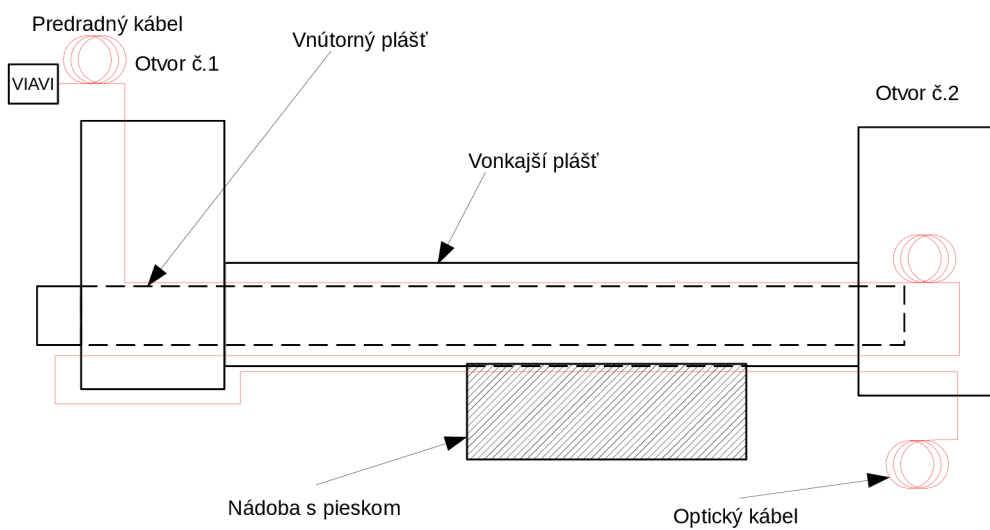
teploty došlo na dlhšej časti kábla, pretože sa v otvore č. 2 nachádzala zvinutá časť kábla za referenčným bodom 2 a došlo k jej zahriatiu. Zvinutá časť kábla mala približne 10 m. Referenčný bod 3 je vo vzdialenosti 561 m a referenčný bod 4 je vo vzdialenosti 564 m od začiatku káblu, respektíve od meracieho prístroja. Referenčný bod 5, ktorý nie je zobrazený na obrázku označuje vzdialenosť referenčnej cievky, ktorá bola pri niektorých meraniach požitá a bola ponorená do vody. Jej vzdialenosť od meracieho prístroja je 572 m a za ňou nasleduje zvyšok kábla a následne zvar medzi dvomi vláknami káblu a spätná trasa po spojku medzi testovaným káblom a predradným káblom vrátane vrcholov.

5.3 Meranie simulovaného úniku medzi plášťami potrubia

Pri rovnakom zapojení ako v predošlom prípade bol simulovaný únik medzi plášte potrubia. Hlavnou trubkou potrubia pretekala voda stálym prietokom. Teplota vody v potrubí sa pohybovala medzi 28,8 až 29,2 °C. Únik bol simulovaný chladnejšou vodou a to čerpaním cez hadičku, ktorá bola medzi plášte zasunutá cez otvor č.2

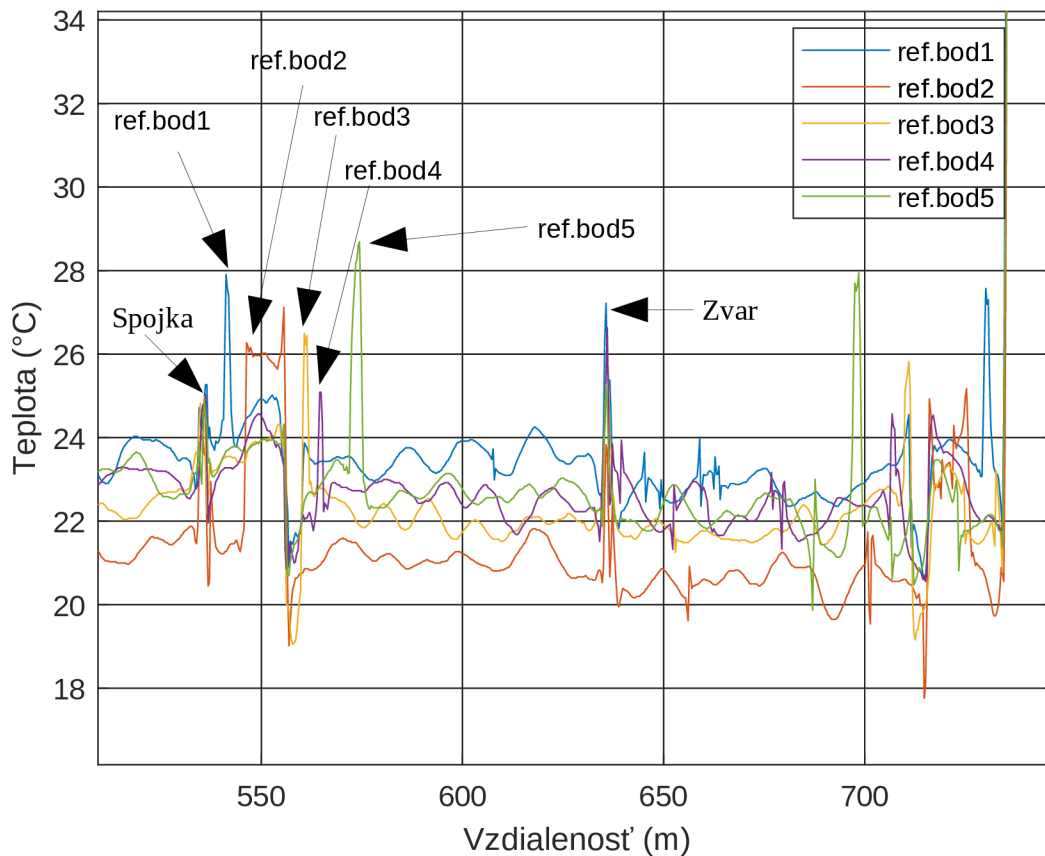


Obr. 5.7: Realizácia zapojenia (centrum AdMaS)



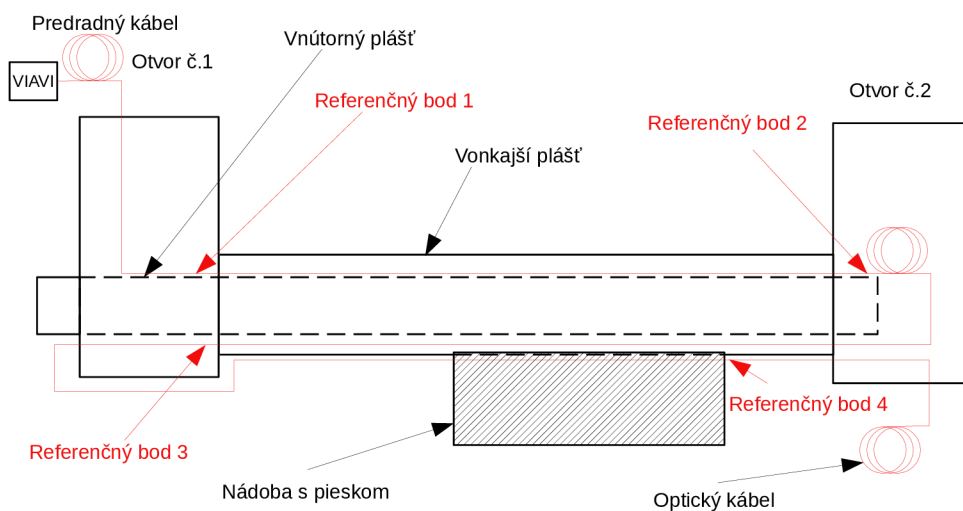
Obr. 5.8: Náskres zapojenia (centrum AdMaS)

do vzdialenosti približne 80 cm od tohto otvoru. Teplota vody simulovaného úniku bola medzi 26,3 až 24,9 °C a pretekala celou dĺžkou potrubia (približne 5 m). Vý-

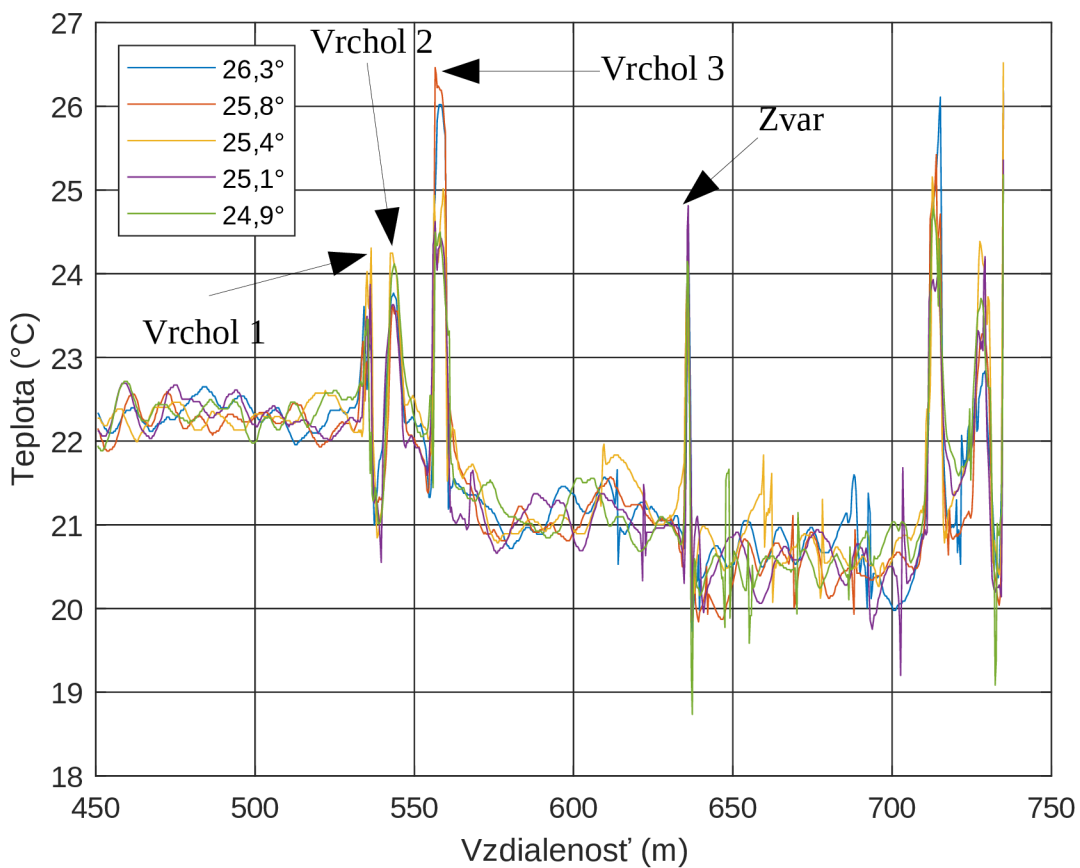


Obr. 5.9: Meranie pomocou teplovzdušnej pištole

sledky merania sú zobrazené v grafe 5.11. Teplota vody pre referenciu bola meraná čidlom ponoreným do vody a vo všetkých prípadoch bola presnosť merania do 0,5 °C (tolerancia prístroja). Hodnoty zapísané v legende grafu sú hodnoty z meracieho prístroja s čidlom ponoreným do vody. Je možné si všimnúť za vrcholom č.1 (spojka) je menej výrazný vrchol – vrchol 2 (únik) oproti hlavnému vrcholu – vrchol 3 (únik) vo vzdialenosti približne 551 m. Vzdialenosť vrcholu 2 odpovedá vzdialenosti referenčného bodu 1 a teda teplota vody simulovaného úniku bola snímaná aj káblom, ktorý sa nachádzal nad vnútorným plášťom potrubia. Hodnota je v porovnaní so spodným káblom nepresná, pretože bola ovplyvnená vzduchom ochladeným vodou simulovaného úniku. Vzduch má zlú tepelnú vodivosť a nestihol sa dostatočne ochladiť, navyše vnútorný plášť potrubia bol ohrievaný pretekajúcou vodou, čo mohlo skresliť túto hodnotu. Za zvarom je opäť spätná trasa s vrcholmi smerom ku spojke (vrchol 1).

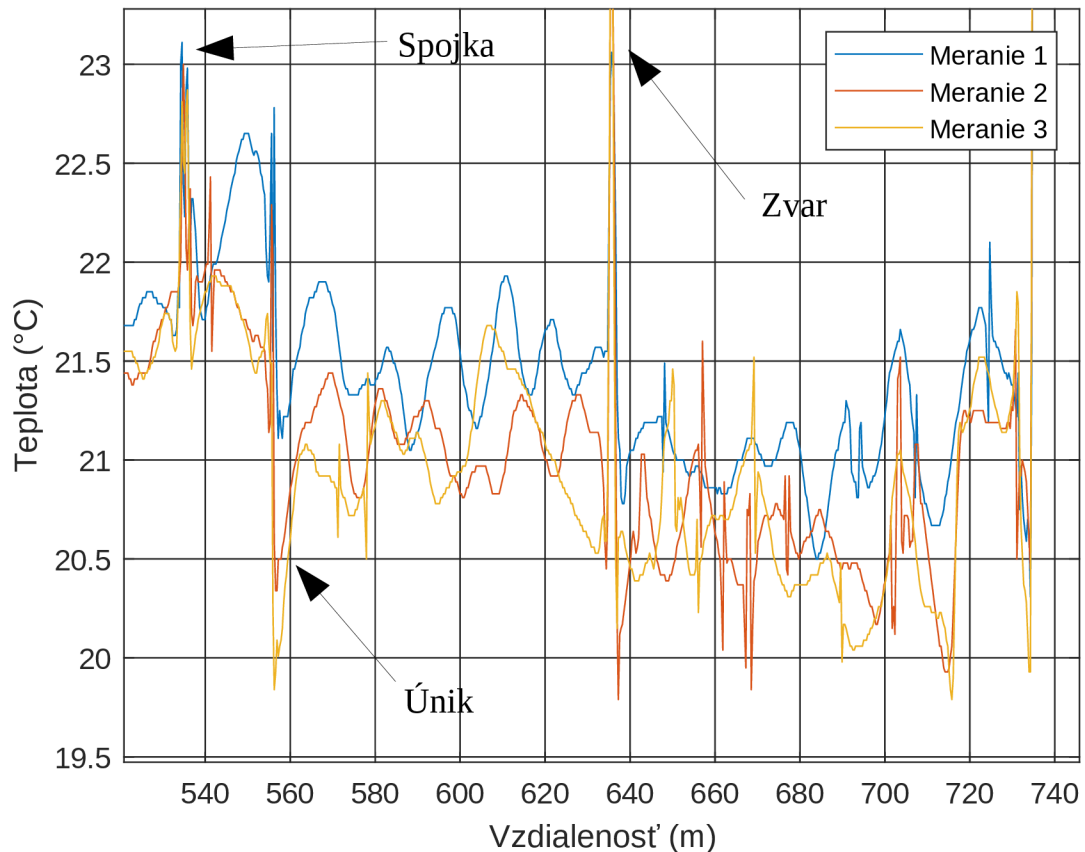


Obr. 5.10: Schéma s vyznačenými referenčnými bodmi



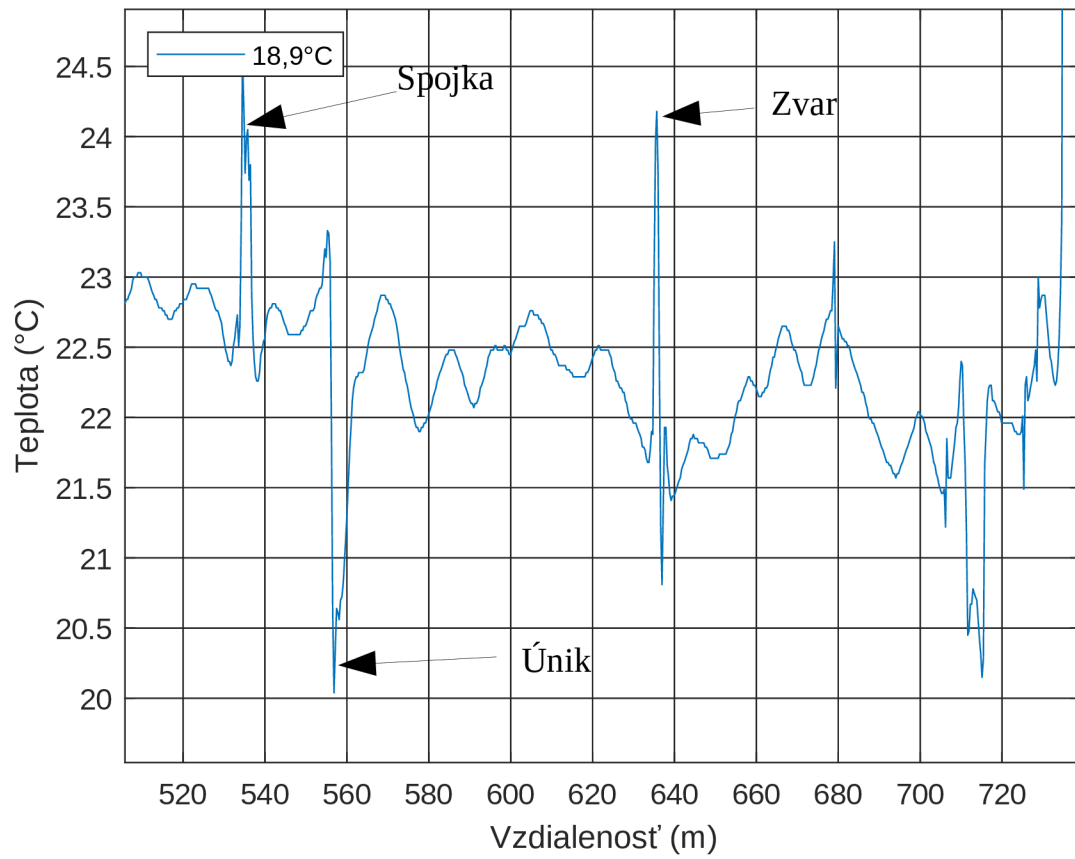
Obr. 5.11: Simulovaný únik medzi plášťami potrubia

Následne bolo zrealizované meranie pri rôznom prietoku, ktorý simuloval únik. Boli testované tri prietoky 280 ml za sekundu 400 ml za sekundu a 550 ml za sekundu. Pri prvom prietoku 280 ml za sekundu boli zrealizované 3 merania pri teplote vody 19,7 °C. Merania boli robené v priebehu 15 minút a každé meranie trvalo 5 minút. Z grafu 5.12 je vidno, že pokles teploty nastal až pri druhom meraní avšak bol veľmi nepresný a po približne 15 minútach od prvého merania došlo k dostatočnému ochladeniu kábla a k správne mu meraniu teploty.

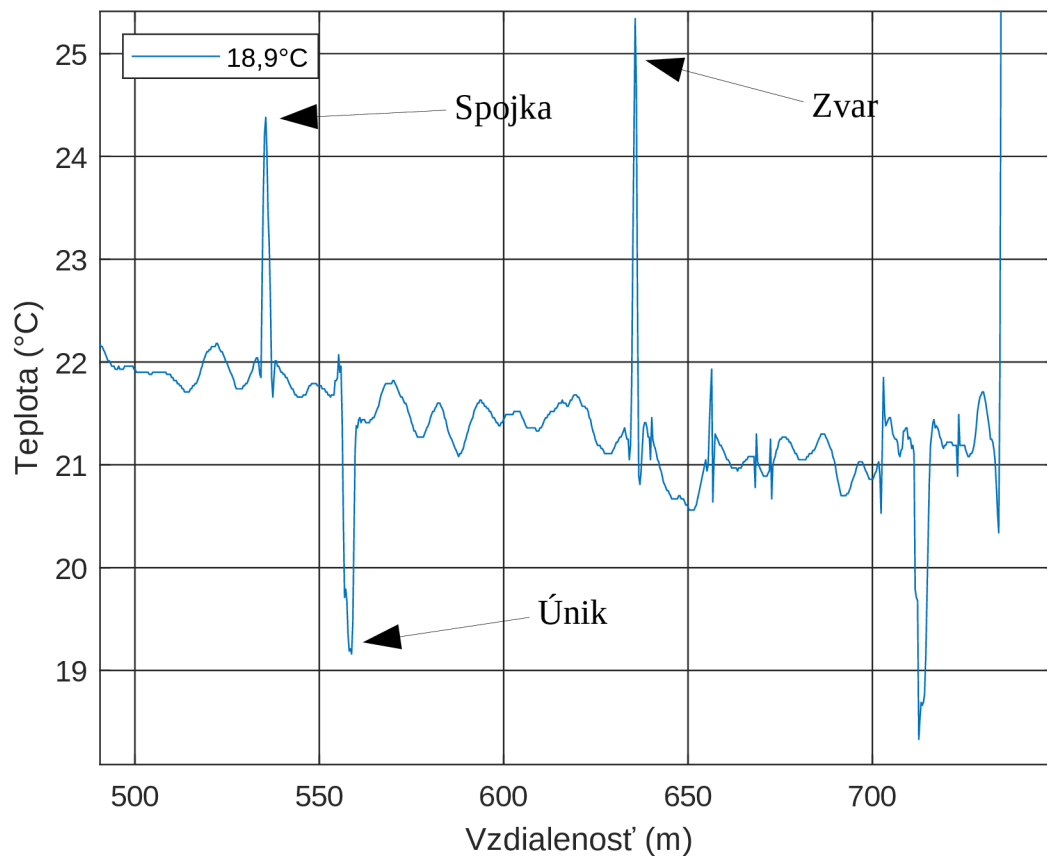


Obr. 5.12: Simulovaný únik medzi plášťami potrubia s prietokom 280 ml za sekundu

Pri teplote 18,9°C bol prietok zvýšený na 400 ml za sekundu pri ktorom došlo k zachyteniu poklesu teploty už pri prvom meraní s nepresnosťou približne 1°C. Výsledok tohto merania je zobrazený na obrázku 5.13. Pre ďalšie meranie teplota ostala nezmenená, ale zvýšil sa prietok na 550 ml za sekundu, kedy nepresnosť merania bola 0,3 °C, 5.14 čo je v tolerancii presnosti meracieho prístroja.



Obr. 5.13: Simulovaný únik medzi plášťami potrubia s prietokom 400 ml za sekundu



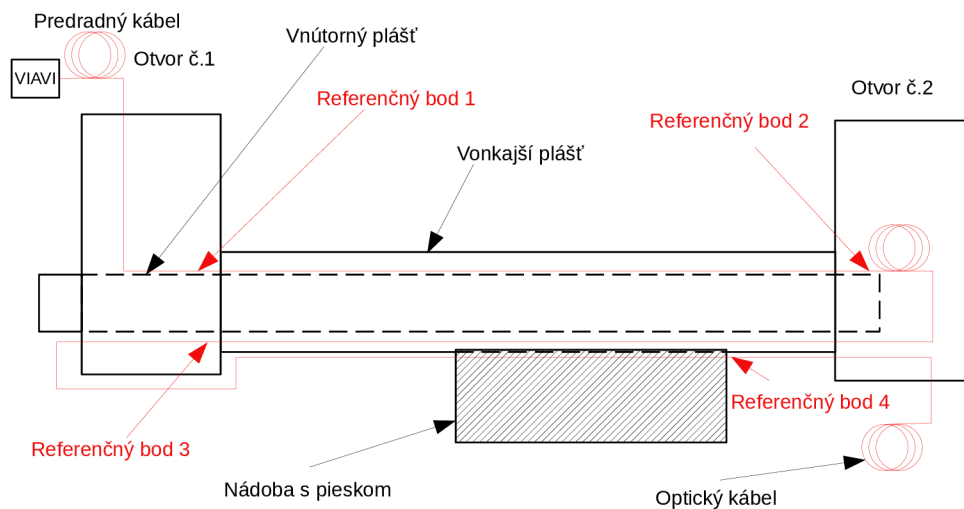
Obr. 5.14: Simulovaný únik medzi plášťami potrubia s prietokom 550 ml za sekundu

5.4 Meranie simulovaného úniku z vonkajšieho plášťa

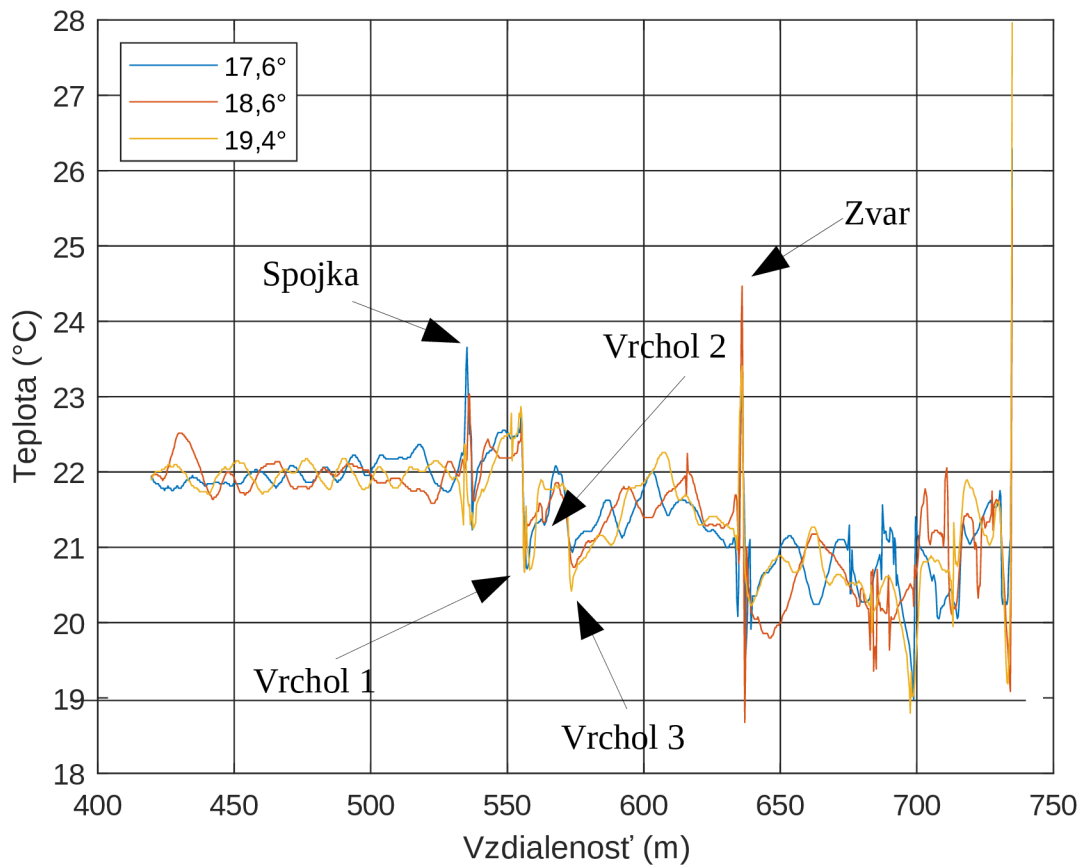
Simulácia úniku z vonkajšieho plášťa do pôdy bola simulovaná v nádobe s pieskom, kde bola zavedená hadička pod potrubie nad optický kábel. Počas meraní na obrázku 5.16 bol prietok vody 140 ml za sekundu a pri meraní na obrázku 5.17 sa prietok zvýšil na 360 ml za sekundu. V grafe merania pri ktorom bol prietok vody 140 ml za sekundu sú znázornené tri vrcholy. Vrchol 1 je vo vzdialenosti 557 m, vrchol 2 je vo vzdialenosti 563 m a vrchol 3 je vo vzdialenosti 573 m. Teplota vody, ktorá simulovala únik sa postupne ochladzovala z 19,4 °C na 17,6°C. Vrchol 1 odpovedá vzdialenosti káblu nachádzajúcemu sa na dne vonkajšieho plášťa potrubia. Keďže hadička, ktorá simulovala únik bola blízko vonkajšieho plášťa na zmenu teploty zareagovalo aj vlákno vo vnútri plášťa. Pretože to bolo spôsobené na malom úseku kábla je táto hodnota kvôli priemerovaniu nepresná, ako to už bolo spomínané vyššie v časti Referenčné meranie v laboratórnych podmienkach s teplotnou komorou. Je však zaujímavé, že kábel, ktorý bol asi 3 cm v piesku pod vonkajším plášťom zachytil

tento pokles teploty (vrchol 2) len veľmi slabo a je diskutabilné, či nejde iba o šum. Vzdialenosť však odpovedá káblu nachádzajúcemu sa v piesku. Tento slabý pokles môže byť spôsobený tým, že trvá relatívne dlhú dobu kým sa piesok výraznejšie ochladí, tak aby to malo vplyv aj na optický kábel. Vrchol 3 je vo vzdialenosti odpovedajúcej referenčnej cievke, ktorá v tejto časti merania nebola použitá a nie je jasné, prečo tam došlo k poklesu teploty.

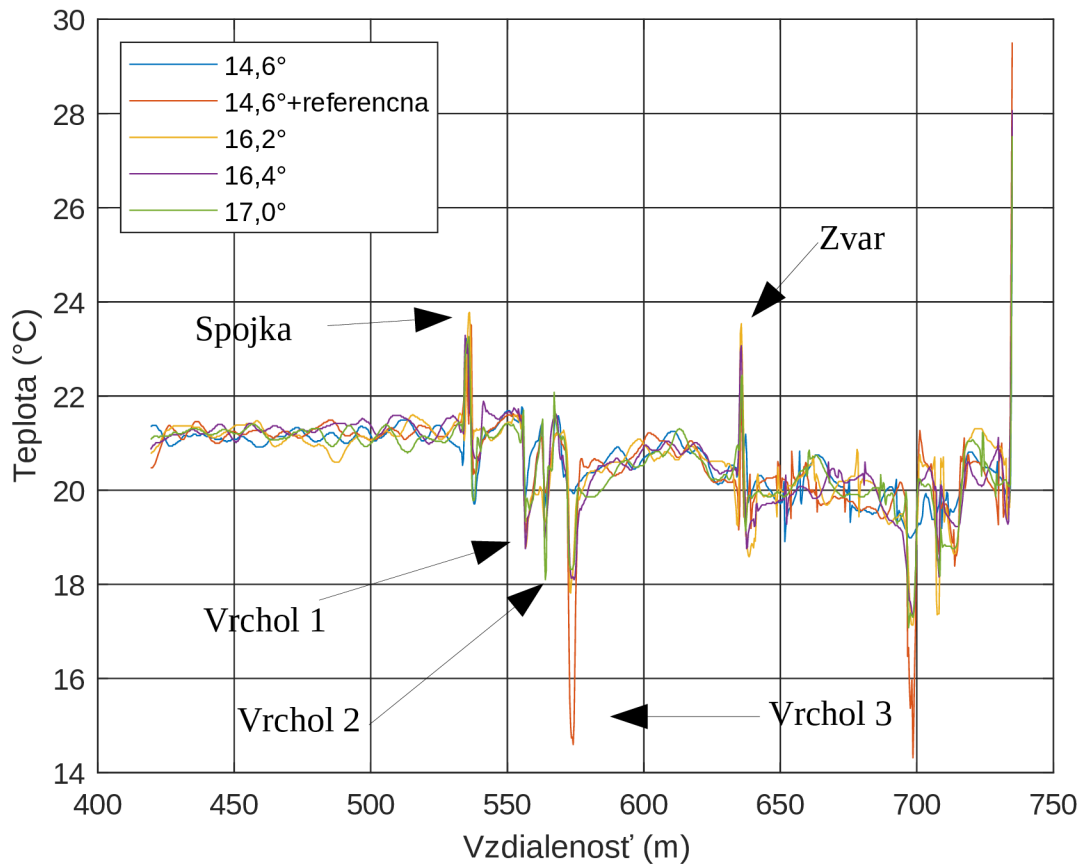
Rovnako ako pri meraní s prietokom 140 ml za sekundu aj pri prietoku 360 ml za sekundu sú zaujímavé 3 vrcholy odpovedajúce rovnakej vzdialenosti, ale pri jednom s meraní bola použitá referenčná cievka ponorená do vody čomu odpovedá výrazný pokles na 14,6 °C. Menšie vrcholy v tejto vzdialenosti sú z ďalších meraní kedy cievka už nebola ponorená vo vode, ale stále nedošlo k jej ohriatiu na vonkajšiu teplotu. Posledné meranie bolo uskutočnené pri teplote vody simulovaného úniku 17 °C, čo bolo približne po 2 hodinách a 20 minútach od prvého merania pri prietoku 140 ml za sekundu. Napriek relatívne dlhému času bol výsledok stále nepresný a nedošlo k dostatočnému ochladeniu kábla. Pre oba merania platí, že znázornené vrcholy sú zobrazené aj za zvarom v opačnom poradí (spätná trasa od zvaru k spojke).



Obr. 5.15: Schéma s vyznačenými referenčnými bodmi



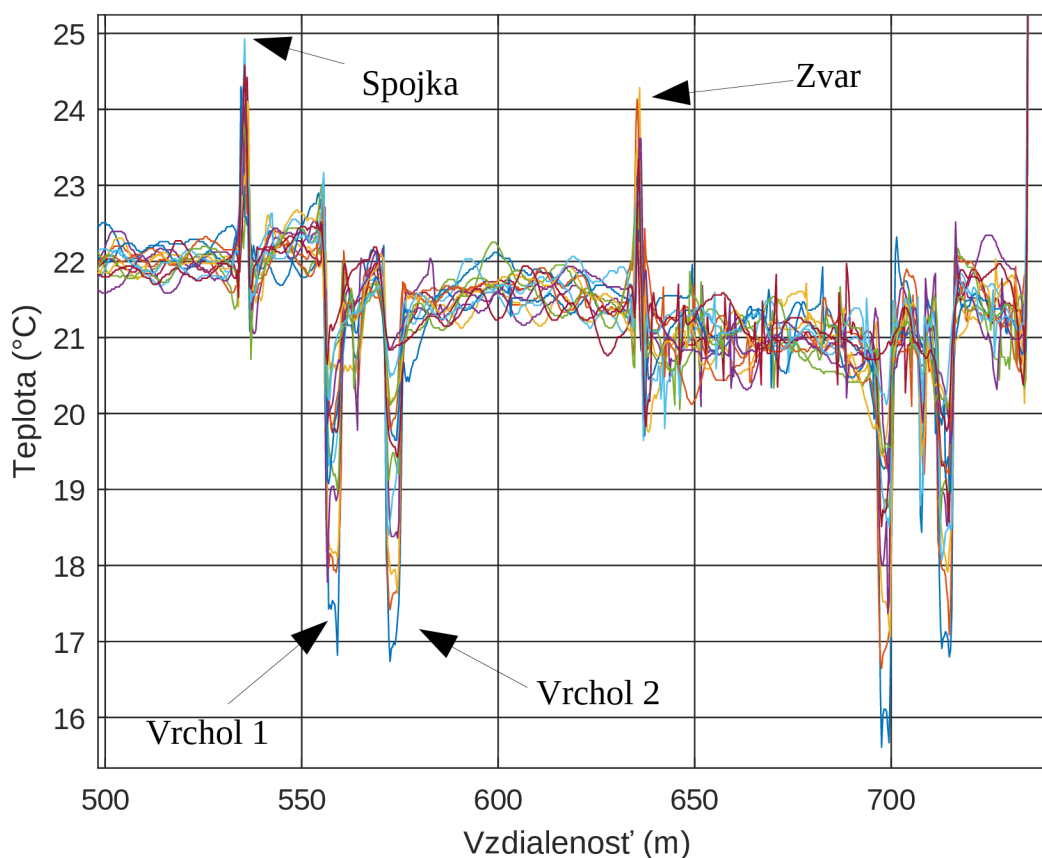
Obr. 5.16: Simulovaný únik z vonkajšieho plášťa s prietokom 140 ml za sekundu



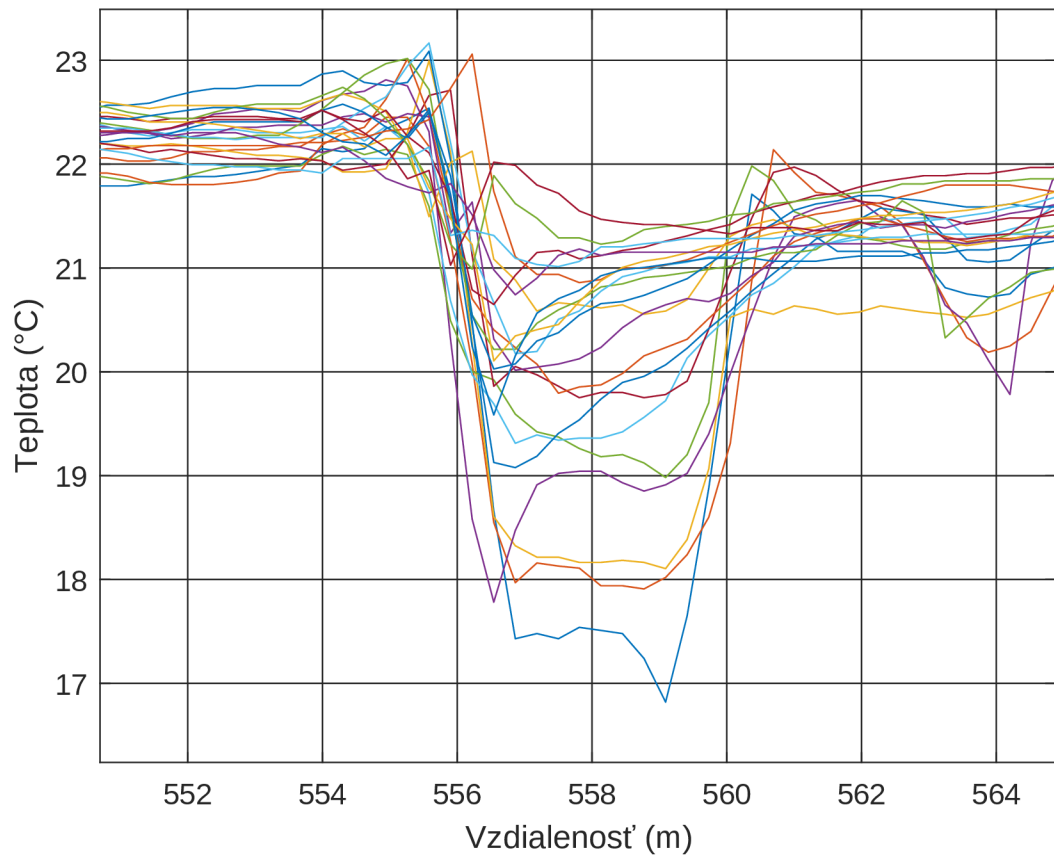
Obr. 5.17: Simulovaný únik z vonkajšieho plášťa s prietokom 360 ml za sekundu

5.5 Priebahové meranie simulovaného úniku medzi plášťami

Toto meranie bolo uskutočnené počas dlhšieho časového úseku. Po dobu 18 hodín bolo meranie uskutočňované každých 20 minút. Na začiatku prvého merania mala voda simulovaného úniku približne 17 °C ako je vidno na obrázku 5.19. Vrchol 1 je meraná teplota vody v potrubí medzi plášťami a vrchol 2 vyznačuje teplotu cievky ponorenej vo vode, ktorá bola použitá na simuláciu úniku ako referencia. Teoreticky by mali byť oba vrcholy rovnaké, čo vo väčšine prípadov nastalo. Odlišnosti môžu byť spôsobené toleranciou prístroja. V grafe na obrázku 5.18 je kvôli prehľadnosti zobrazených iba prvých 14 meraní. V grafe 5.19 na ktorom je priblížený Vrchol 1 je vidno ako sa teplota vody zvyšovala, až takmer dosiahla vonkajšiu teplotu a pri ďalších meraniach nedochádzalo k zmene teploty, keďže voda dosiahla teplotu okolia. Pre dlhší úsek počas ktorého by dochádzalo k meraniam je možné nastaviť väčší interval uskutočňovania meraní. V tomto prípade sa teplota vody zvyšovala relatívne rýchlo a preto bol nastavený interval na 20 minút.



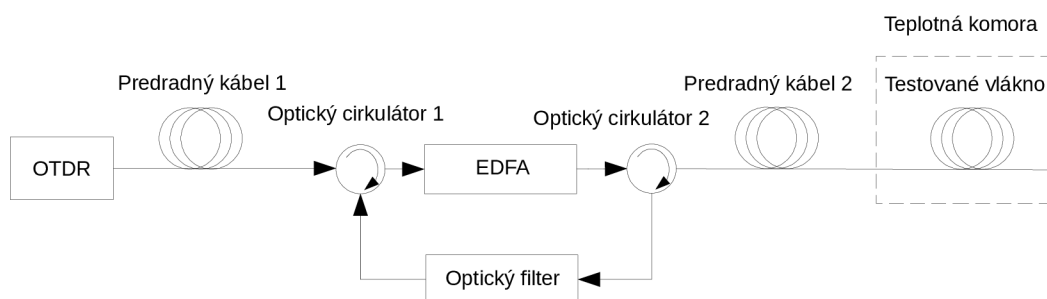
Obr. 5.18: Priebahové meranie simulovaného úniku medzi plášťami



Obr. 5.19: Priebové meranie simulovaného úniku medzi plášťami

6 Meranie pomocou klasického OTDR

Meranie prebehlo v laboratórnych podmienkach a bolo použité vlastné zapojenie, ktorého bloková schéma je na obrázku 6.1. Schéma sa skladá zo základných blokov OTDR, EDFA, dva optické cirkulátory, optický filter a teplotná komora. Použité sú dva predradné káble s dĺžkou približne 500 m a testovaný kábel s dĺžkou približne 10 m. Jednotlivé bloky a ich funkcie sú popísané nižšie.



Obr. 6.1: Schéma zapojenia merania s OTDR

- OTDR - slúžilo na vysielanie svetelných impulzov o vlnovej dĺžke 1550 nm a na detekciu spätného rozptylu svetla a jeho spracovanie.
- Optický cirkulátor - je pasívna optická súčiastka, ktorá prepúšťa svetelný impulz len jedným smerom z portu 1 na port 2 a z portu 2 na port 3 ale neprepustí svetelný impulz napr. z portu 3 na port 2.
- EDFA - je vláknový eribiom dopovaný zosilňovač, ktorého úlohou bolo zosilniť optický signál smerujúci do testovaného kábla.
- Teplotná komora - slúžila na reguláciu teploty. V teplotnej komore sa nachádzala časť testovaného kábla.
- Optický filter - Optický filter slúžil na vyfiltrovanie vlnovej dĺžky 1450 nm, čo odpovedá vlnovej dĺžke anti-Stokesovej zložky, ktorá je závislá na teplote.

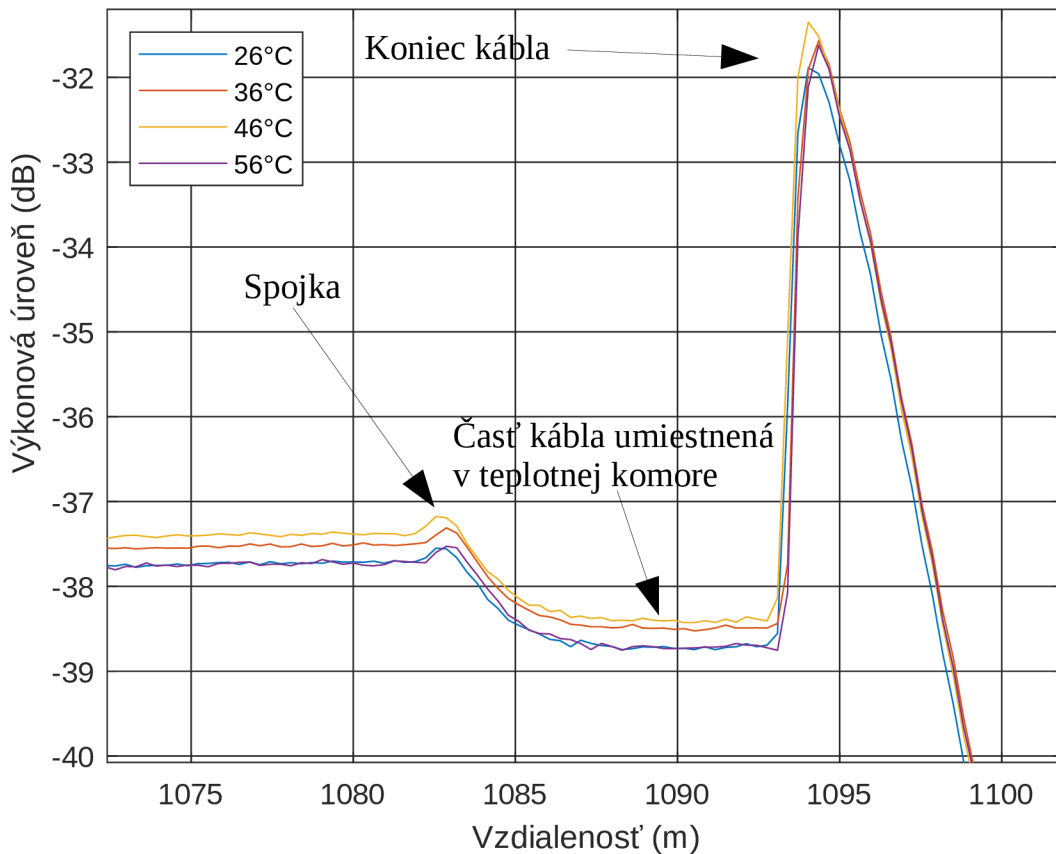
Reálne zapojenie všetkých častí je zobrazené na obrázku 6.2. V ľavej hornej časti obrázka sa nachádza teplotná komora s ovládacím panelom. V ľavej dolnej časti je prístroj na meranie OTDR, v tomto prípade išlo o prístroj Atomo wave SOT-A80. V pravej časti sú predradné vlákna a zapojenie EDFA zosilňovača s optickými cirkulátormi a optickým filtrom.



Obr. 6.2: Reálne zapojenie merania s OTDR

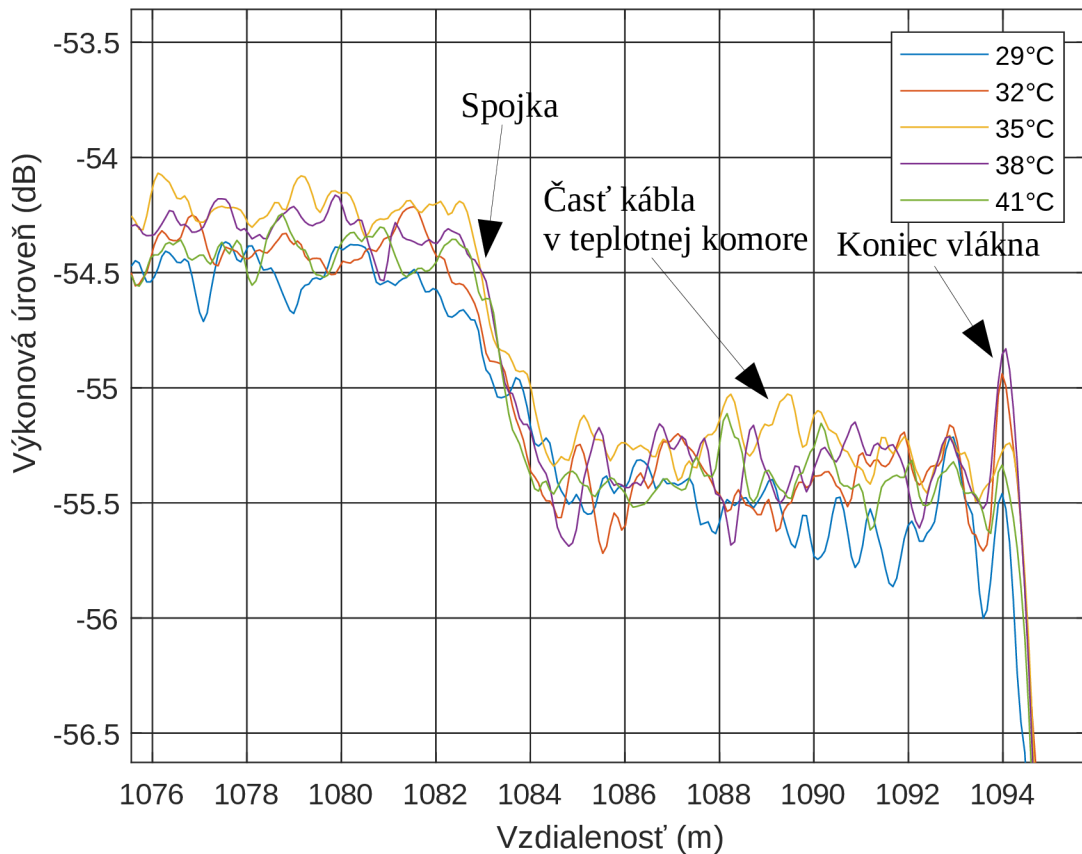
6.1 Meranie pri umiestnení 10 cm kábla do teplotnej komory

Do teplotnej komory bolo umiestnených 10 cm kábla a bolo realizované meranie. Parametre merania boli nastavené na prístroji Atomo wave SOT-A80, ktoré bolo použité pri tomto meraní. Vlnová dĺžka svetelných impulzov bola 1550 nm a šírka impulzu 10 ns. Dĺžka merania bola nastavená na 120 sekúnd a rozsah vzdialenosti na 2,5 km. Teplota sa menila o 10°C v rozmedzí od 26°C do 56°C. Na obrázku 6.3 je zobrazená časť grafu, ktorá odpovedá vzdialenosti testovaného vlákna (za spojkou). Z grafu vidno, že nedošlo k žiadnej zmene pri zvýšení teploty, čo bolo pravdepodobne spôsobené slabou citlivosťou prístroja a príliš širokým impulzom (10 ns impulz odpovedá 1 m priestorovému rozlíšeniu). Zaujímavá je nestabilita výkonu medzi jednotlivými meraniami.



Obr. 6.3: Meranie s Atomo wave SOT-A80 pri 10 cm kábla v teplotnej komore

Jednou z možností ako eliminovať slabú citlivosť prístroja bola zámena prístroja Atomo wave SOT-A80 za Exfo FTB-1. Ďalšie meranie bolo uskutočnené na tomto prístroji pri ponechanej dĺžke kábla v teplotnej komore. Parametre nastavenia boli podobné ako pri predošlom prístroji vlnová dĺžka lasera na 1550 nm a šírka impulzu 10 ns. Dĺžka merania bola nastavená na 60 sekúnd a rozsah vzdialenosti na 1,25 km. Časť grafu odpovedajúca vzdialenosti testovaného vlákna je zobrazená na obrázku 6.4. Rozsah teploty sa menil od 29 °C do 41°C o 3°C.



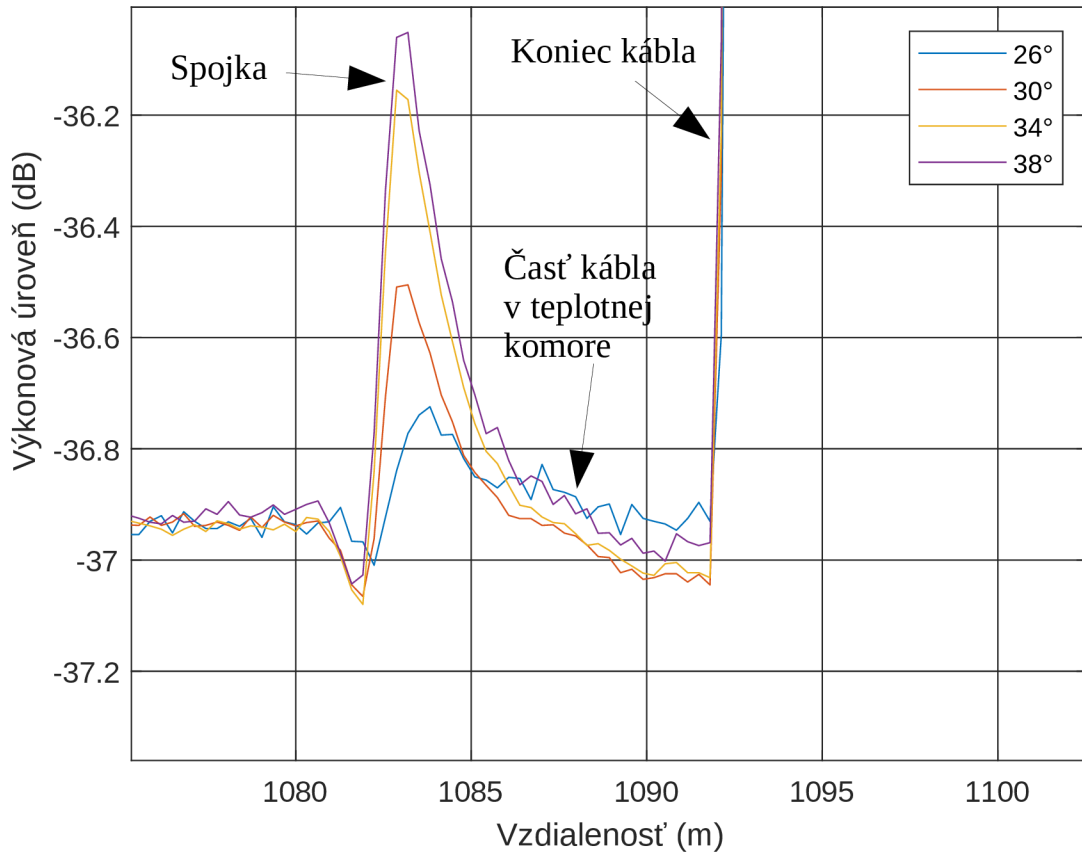
Obr. 6.4: Meranie s Exfo FTB-1 pri 10 cm kábla v teplotnej komore

Opäť nedošlo k žiadnemu snímaniu teploty, to znamená, že pravdepodobne citlivosť prístroja neovplyvnila meranie. Pre zlepšenie úrovne šumu by bolo potrebné zvýšiť čas merania. Následne boli uskutočnené ďalšie pokusné merania, ktoré sú popísané nižšie

6.2 Meranie pri umiestnení 1 m kábla do teplotnej komory

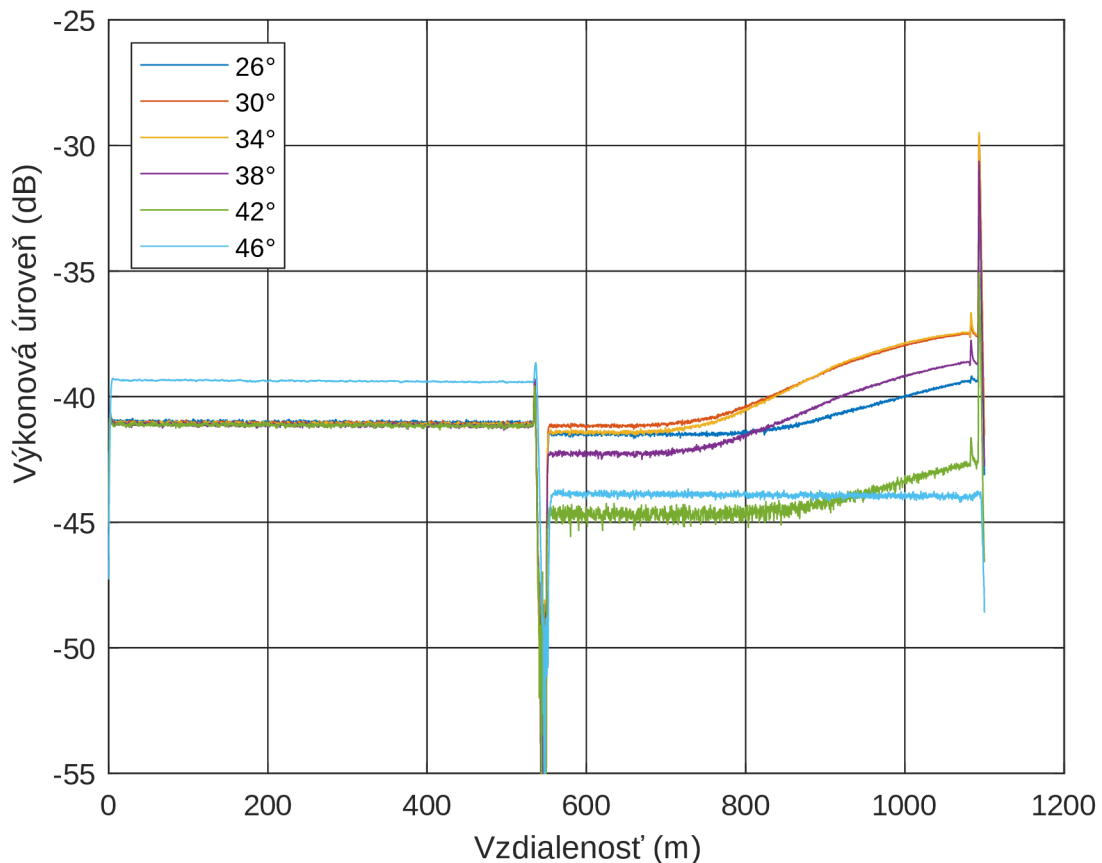
Pri tomto meraní bolo použité rovnaké zapojenie, avšak do teplotnej komory bol miesto 10 cm kábla zmotaný 1 m kábla. Prístroje na meranie OTDR boli opäť použité Atomo wave SOT-A80 a Exfo FTB-1. U Atomo wave SOT-A80 bolo nastavenie parametrov obdobné ako v predošlom prípade na vlnovú dĺžku použitého lasera 1550 nm so šírkou impulzu 10 ns. Dĺžka merania bola nastavená na 180 sekúnd a rozsah vzdialenosti na 2,5 km. K zmene teploty dochádzalo o 4 °C od 26 °C do 38°C. Napriek zmene niektorých parametrov a dĺžky kábla v teplotnej komore nebola zaznamenaná zmena úrovne výkonu pri zmene teploty, ako je vidno v grafe

na obrázku 6.5 Medzi jednotlivými meraniami dochádzalo k veľkému rozdielu medzi výkonovými úrovňami za prvým predradným vláknom. Na obrázku 6.5 sú tieto rozdiely kompenzované aby bolo možné porovnať výsledky na testovanom vlákne. Grafy jednotlivých meraní bez kompenzácie sú zobrazené na obrázku 6.6. Na tomto obrázku sú zobrazené ďalšie dva merania pri teplote 42 a 46 °C



Obr. 6.5: Meranie s Atomo wave SOT-A80 pri 1 m kábla v teplotnej komore

Po uskutočnení prvých 4 meraní z neznámeho dôvodu začala klesať výkonová úroveň, ako je zobrazené na obrázku 6.6. Výkonová úroveň poklesla už pri meraní teploty 38 °C, ale k výraznejšiemu poklesu došlo až pri meraní teploty 42 °C. Pri tomto poklese je vidno ako sa zvýšila úroveň šumu. Pri meraní teploty 46 °C pri šírke impulzu 10 ns už nebolo možné zrealizovať meranie celej trasy, pretože výkonová úroveň poklesla tak výrazne, že meranie bolo zaznamenané iba po koniec prvého predradného vlákna a bolo potrebné zvýšiť šírku impulzu na 25 ns. Následne bol použitý citlivejší prístroj Exfo FTB-1.



Obr. 6.6: Meranie s Atomo wave SOT-A80 pri 1 m kábla v teplotnej komore bez kompenzácie

S prístrojom Exfo FTB-1 boli uskutočnené ďalšie merania pri nastavení parametrov: vlnová dĺžka lasera 1550 nm, šírka impulzu 10 ns, dĺžka merania 180 sekúnd a rozsah vzdialenosti 1,25 km. V teplotnej komore sa opäť nachádzal 1 m kábla. Bolo realizovaných 5 meraní v rozmedzí teplôt 39 °C až 59 °C s krokom 5 °C. Aj napriek predošlému poklesu výkonovej úrovne bolo možné zosnímať celú trasu pri šírke impulzu 10 ns, ale stále došlo k pomerne veľkému šumu a kolísaniu výkonovej úrovne za prvým predradným vláknom ako je vidno na obrázku 6.7. Pre porovnanie jednotlivých výkonových úrovní bolo potrebné ich vykompenzovanie a na obrázku 6.8 je zobrazená priblížená časť grafu v oblasti testovaného kábla. Z grafu vidno, že došlo k určitému vrcholu v mieste, čo odpovedá vzdialenosti testovaného kábla (1082 - 1092 m). K vrcholu došlo v strede kábla, čo odpovedá časti kábla umiestneného v teplotnej komore. Medzi jednotlivými výkonovými úrovňami sú nepatrné rozdiely a dá sa predpokladať, že to bolo následkom zvýšenia teploty, avšak kvôli vysokému šumu a nízkej výkonovej úrovni sú výsledky veľmi nepresné. Pre väčšiu presnosť by bolo potrebné snímanie Stokesovej zložky, čo však použitými prístrojmi nebolo možné. Následne by bolo možné vypočítať teplotu pomocou vzťahu 6.1

$$T(z) = [A \Delta dB(z) - D * z + B]^{-1} \quad (6.1)$$

kde $\Delta dB(z)$ je rozdiel medzi výkonovou úrovňou Stokesovej a anti-Stokesovej zložky vyjadrenej v logaritmickom merítke

$$A = \frac{\ln 10 * k_b}{5 * h * \Delta f} \quad (6.2)$$

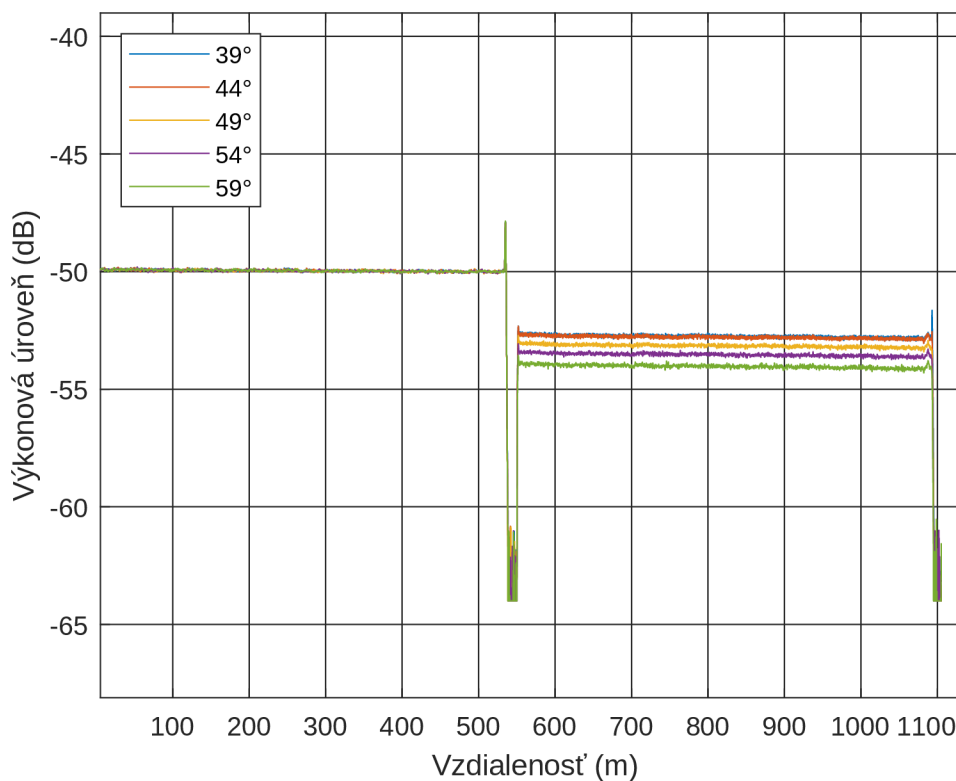
kde k_b je Boltzmanova konštanta, h je Plankova konštanta a Δf je ramanov posun (frekvenčný posun medzi budiacim signálom a Stokesovou zložkou alebo anti-Stokesovou zložkou).

$$B = \frac{C * \ln 10 * k_b}{5 * h * \Delta f} \quad (6.3)$$

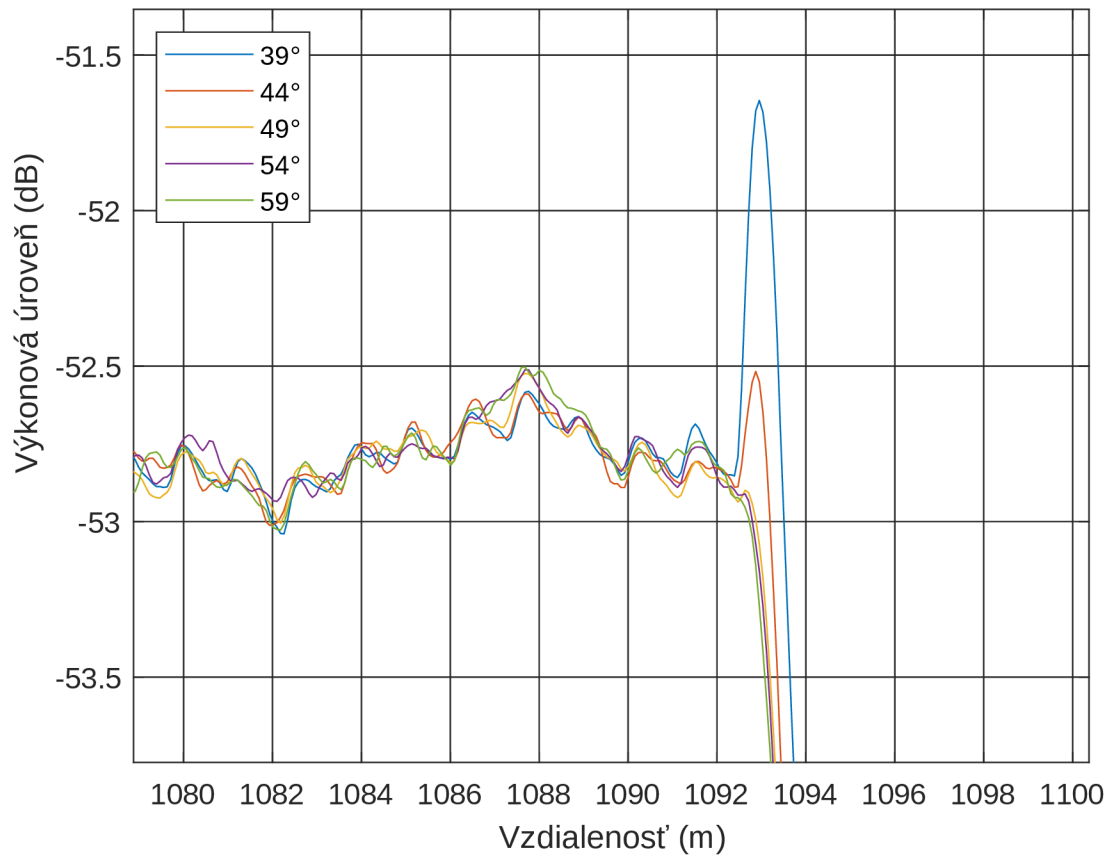
kde C je teplotný koeficient

$$D = \frac{\Delta \alpha * \ln 10 * k_b}{5 * h * \Delta f} \quad (6.4)$$

kde $\Delta \alpha = \alpha_{AS} - \alpha_S$ je diferenciálny útlm, vzhľadom na α_{AS} a α_S , ktoré sú útlmové koeficienty pri Stokesovej a anti-Stokesovej vlnovej dĺžky.



Obr. 6.7: Meranie s Exfo FTB-1 pri 1 m kábľa v teplotnej komore bez kompenzácie



Obr. 6.8: Meranie s Exfo FTB-1 pri 1 m kábla v teplotnej komore

Záver

V práci je naštudovaná problematika využitia optického vlákna ako distribuovaného teplotného senzoru. V prvej časti sú popísané základy optických vlákien. Základné delenie optických vlákien a ich parametre. Medzi parametrami sú rozobraté jednotlivé rozptyly, ktoré dochádzajú v optickom vlákne, ako je Reyleighov rozptyl, Ramanov rozptyl a Brillouinov rozptyl. Ďalšia časť sa zaoberá optickými vláknovými senzormi. V tejto časti je spracovaná história, všeobecný princíp fungovania, vlastnosti, rozdelenie a použitie optických vláknových sensorov. Základným rozdelením OVS je na bodové a distribuované. Táto práca sa zaoberá distribuovanými optickými vláknovými senzormi. Tento typ sensorov sníma veličiny pôsobiace na vlákno počas celej dĺžky vlákna a jeho hlavnou výhodou sú malé rozmery na obrovské množstvo sledovaných bodov (celá dĺžka vlákna). Pri využití distribuovaných vláknových sensorov sa používajú rôzne metódy merania. V práci sú rozobraté 3 metódy. Koherentná OTDR s využitím Reyleighovho rozptylu, OTDR s využitím Ramanovho rozptylu a OTDR s využitím Brillouinovho rozptylu. Následne sú porovnané parametre jednotlivých prístrojov na trhu, ktoré využívajú rôzne metódy merania. Keďže stále dochádza k vylepšovaniu parametrov týchto metód a výskum nových špeciálnych vlákien pre určité druhy snímaných veličín, je spracované zhrnutie, ktorým smerom sa tento výskum ubera.

V ďalšej časti sú popísané merania s využitím meracieho prístroja VIAVI MTS 6000A pri rôznych zapojeniach. Boli realizované dva referenčné merania. Jedno meranie v laboratórnych podmienkach s využitím teplotnej komory a druhé meranie s použitím teplovzdušnej pištole na odlišnom zapojení. V prvom prípade došlo k relatívne presnému meraniu teploty s presnosťou 1°C , čo bolo pravdepodobne spôsobené veľkosťou a teplotnou nestabilitou teplotnej komory. V druhom prípade bolo pomocou teplovzdušnej pištole fúkaný vzduch na kábel o teplote 220°C , avšak odmeraná teplota bola iba okolo $26 - 29^{\circ}\text{C}$. Táto nepresnosť je spôsobená časovým úsekom pôsobenia teplovzdušnou pištoľou a priestorovým rozlíšením nastaveným na prístroji, čo súvisí s priemerovaním počas doby merania. Pri tomto meraní nebola dôležitá presnosť merania teploty, ale išlo o vzdialenosť bodov, kde bolo pôsobenie teplovzdušnej pištole. Pri rovnakom zapojení ako pri meraní s použitím teplovzdušnej pištole v centre AdMaSu - Vysokého učení technického v Brně boli realizované ďalšie merania. Išlo o využitie distribuovaného teplotného optického vláknového senzoru pri detekovaní úniku odpadových vôd z dvojplášťového potrubia. Prvým meraním bola detekcia simulovaného úniku medzi plášťami potrubia. Výsledky merania boli veľmi presné (do $0,5^{\circ}\text{C}$ v porovnaní s referenčnou teplotou) a nepresnosť sa pohybovala v tolerancii prístroja. Detekcia simulovaného úniku bola úspešná. Testovaný bol aj únik z vonkajšieho plášťa do pôdy (piesku), ktorý bol detekovaný, avšak ur-

čenie teploty bolo veľmi nepresné a trvalo približne 2 hodiny 20 minút, aby meranie bolo presné na 1°C. Všetky tieto merania boli merané jednorázovým meraním, avšak merací prístroj použitý pri týchto meraniach má možnosť priebehového merania. V práci je meranie počas 18 hodín s časovým intervalom meraní 20 minút. Meranie bolo robené pri simulácii úniku medzi plášťami potrubia. Výsledkom bolo sledovanie otepľovania vody použitej na simuláciu úniku. Porovnávala sa voda v potrubí s referenčnou teplotou vody v kadi z ktorej sa čerpala voda na simuláciu úniku.

Posledná časť práce bola zameraná na vlastné zapojenie s využitím klasického OTDR. Vlastné zapojenie pozostávalo s prístroja na meranie OTDR, 2 predradných vlákien, EDFA zosilňovača, 2 optických cirkulátorov, optického filtra a testovaného vlákna, z ktorého časť bola umiestnená v teplotnej komore. Bolo realizované merania na dvoch prístrojoch Atomo wave SOT-A80 a Exfo FTB-1 a pri umiestnení 10 cm káblu do teplotnej komory a 1 m káblu do teplotnej komory. Pri umiestnení 10 cm káblu v teplotnej komore ani jeden prístroj nedokázal zaznamenať zmenu teploty v komore pričom dochádzalo k veľkému rozptylu výkonovej úrovne za prvým predradným vláknom. Pri umiestnení 1 m káblu v teplotnej komore taktiež dochádzalo k veľkému rozptylu výkonovej úrovne za prvým predradným vláknom. Po určitom čase došlo k poklesu výkonovej úrovne a prvým meracím prístrojom nebolo možné meranie pri dostatočnej šírke impulzu. Pomocou prístroja Exfo FTB-1 bolo možné pozorovať zmenu, ktorá však bola veľmi malá a nepresná. Bolo by potrebné analyzovať prečo dochádzalo k tak veľkému rozptylu výkonových úrovní medzi meraniami, a taktiež, prečo došlo k poklesu výkonovej úrovni.

Literatúra

- [1] MIGUEL LÓPEZ-HIGUERA, José, ed. *Handbook of optical fibre sensing technology*. West Sussex: John Wiley, 2002. ISBN 0-471-82053-9.
- [2] HLAVÁČ, Marek. *Optické vláknové senzory s rozloženými parametrami na báze OTDR*. Bratislava, 2011. Dizertačná práca. Slovenská technická univerzita v Bratislave.
- [3] Optické vláknové snímače teploty. *Automa* [online]. 2011, **2011**(8), 6 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/opticke-vlaknove-snimace-teploty-2011_08_44586_5085/
- [4] YIN, Shizhuo, Paul B. RUFFIN a Francis T. S. YU, ed. *Fiber optic sensors*. 2. vydanie. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008. ISBN 978-1-4200-5365-4.
- [5] TO SO YU, Francis a Shizhuo YIN. *Fiber Optic Sensors*. New York - Basel: Marcel Dekker, 2002, s. 1-41. ISBN 0-8247-0732-8.
- [6] HYNEK, Jiří. *Distribúované optické vláknové senzory*. Brno, 2013. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brne.
- [7] TURÁN, J. a S. PETRÍK. *Optické vláknové senzory*. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-05-00655-1.
- [8] FIDANBOYLU, Kemal. *FIBER OPTIC SENSORS AND THEIR APPLICATIONS*. 2015, , 7.
- [9] FRAZÃO, Orlando, José M. BAPTISTA a José L. SANTOS. Recent Advances in High-Birefringence Fiber Loop Mirror Sensors. *Sensors*. 2007, (7), 14.
- [10] P. AGRAWAL, Govind. *Nonlinear Fiber Optics*. 5. Oxford UK: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-12397-023-7.
- [11] P. PAL, Bishnu, ed. *Fundamentals of Fibre Optics in Telecommunication and Sensor Systems*. New Delhi: New Age International, 1992. ISBN 81-224-0469-3.
- [12] NIKLÉS, Marc, Luc THÉVENAZ a Philippe A. ROBERT. Brillouin Gain Spectrum Characterization in Single-Mode Optical Fibers. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*. 1997, 15(10), 10.
- [13] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika*. Brno: Code Creator, 2015. ISBN 978-80-88058-20-5.

- [14] ZHU, George. Multimode Graded Index Fiber: What It Is And Why You Need To Know. *M2 Optics, Inc* [online]. 2018 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.m2optics.com/blog/multimode-graded-index-fiber-what-it-is-and-why-you-need-to-know>
- [15] LU, Ping, Nageswara LALAM, Mudabbir BADAR, Bo LIU, Benjamin T. CHORPENING, Michael P. BURIC a Paul R. OHODNICKI. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective. *Applied Physics Reviews* [online]. 2019, 6(4), 35 [cit. 2020-05-02]. DOI: 10.1063/1.5113955. Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5113955>
- [16] CHERUKUPALLI, Sudhakar a George J. ANDERS. *Distributed Fiber Optic Sensing and Dynamic Rating of Power Cables*. Wiley, 2019. ISBN 978-1-119-48770-8.
- [17] LU, Xin, Marcelo A. SOTO a Luc THÉVENAZ. MilliKelvin resolution in cryogenic temperature distributed fibre sensing based on coherent Rayleigh scattering. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2014, , 5. DOI: 10.1117/12.2059659.
- [18] H.HARTOG, Arthur. *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. 1. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 978-1-4822-5957-5.
- [19] LI, Jian et al. High-accuracy distributed temperature measurement using difference sensitive-temperature compensation for Raman-based optical fiber sensing. *Optics Express*. 2019, 27(25), 15. DOI: 10.1364/OE.27.036183.
- [20] BASTIANINI, Filippo. Optical fibre cables for Brillouin distributed sensing applications. 2019.
- [21] MUANENDA, Yonas, Claudio J. OTON a Fabrizio DI PASQUALE. Application of Raman and Brillouin Scattering Phenomena in Distributed Optical Fiber Sensing. *Frontiers in Physics*. 2019, (7), 14. DOI: 10.3389/fphy.2019.00155.
- [22] DELEPINE-LESOILLE, Sylvie et al. Validation of TW-COTDR method for 25km distributed optical fiber sensing. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2013, (8794), 4. DOI: 10.1117/12.2025802.
- [23] KISHIDA, Kinzo, Yoshiaki YAMAUCHI a Artur GUZIK. Study of Optical Fibers Strain-Temperature Sensitivities Using Hybrid Brillouin-Rayleigh System. *PHOTONIC SENSORS*. 2014, 4(1), 11.

- [24] RAJAN, Ginu a Gangadhara B. PRUSTY. *Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fibre Optic Methods*. 1. CRC Press, 2016. ISBN 978-1498733175.
- [25] LAAROSI, Ismail, J.M. LÓPEZ-HIGUERA a María QUINTELA-INCERA. Comparative Experimental Study of a High-Temperature Raman-Based Distributed Optical Fiber Sensor with Different Special Fibers. *Sensors*. 2019, 19(3), 13. DOI: 10.3390/s19030574.
- [26] CHAPMAN, David et al. *Introduction to Tunnel Construction*. 2. CRC Press, 2017. ISBN Introduction to Tunnel Construction.
- [27] DELEPINE-LESOILLE, Sylvie et al. France's State of the Art Distributed Optical Fibre Sensors Qualified for the Monitoring of the French Underground Repository for High Level and Intermediate Level Long Lived Radioactive Wastes. *Sensors*. 2017, 17(6), 32. DOI: 10.3390/s17061377.
- [28] OZ Optics. *OZ Optics* [online]. 2018 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: https://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0138.pdf
- [29] OZ Optics. *OZ Optics* [online]. 2018 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: https://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0139.pdf
- [30] Yokogawa. *Yokogawa* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.yokogawa.com/eu/solutions/products-platforms/field-instruments/fiber-optic-sensor/distributed-temperature-sensing-dtsx200/#Details>
- [31] Yokogawa. *Yokogawa* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.yokogawa.com/eu/solutions/products-platforms/field-instruments/fiber-optic-sensor/distributed-temperature-sensing-dtsx3000/#Details>
- [32] Canada Huiangu Technology. *Cahuiangu* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <http://www.cahuiangu.com/our-products-distributed-optical-fiber-temperature-monitoring-system/>
- [33] Canada Huiangu Technology. *Cahuiangu* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <http://www.cahuiangu.com/our-products-hdts4-english/>
- [34] Canada Huiangu Technology. *Cahuiangu* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <http://www.cahuiangu.com/our-products-high-precision-distributed-brillouin-optical-fiber-sensing-moni>

- [35] Silixa. *Silixa* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://silixa.com/products/>
- [36] Neubrex. *Neubrex* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.neubrex.com/htm/products/pro-nbx7031.htm>
- [37] Bandweaver. *Bandweaver* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.bandweaver.com/products/t-laser-dts/>
- [38] Bandweaver. *Bandweaver* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.bandweaver.com/products/firelaser-dts/#1469117554593-eae5f1b5-a33b>
- [39] LIOS EN.SURE LONG RANGE POWER CABLE DTS SYSTEM. *NKT Photonics* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.nktphotonics.com/lios/en/product/lios-en-sure-long-range-power-cable-monitoring-system/>
- [40] DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSING MARKET. *MarketsandMarkets* [online]. 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/distributed-temperature-sensing-system-market-116007783.html>
- [41] XU, Xiaomin a Jize YAN. Simulation of BOTDA and Rayleigh COTDR systems to study the impact of noise on Dynamic sensing. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*. 2014, 8(3), 8.
- [42] YAN, Baoqiang et al. Raman Distributed Temperature Sensor with Optical Dynamic Difference Compensation and Visual Localization Technology for Tunnel Fire Detection. *Sensors*. 2019, 19(10), 12. DOI: 10.3390/s19102320.
- [43] *VIAVI Solutions* [online]. [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: <https://www.viavisolutions.com/en-us/corporate/about-us>
- [44] *VIAVI Fiber sensing module User manual*. Kalifornia, 2019.
- [45] *VIAVI T-BERD® /MTS-6000A Compact Network Test Platform*. Viavi Solutions, 2015.

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

| | |
|-----------------|--|
| OVS | Optické vláknové senzory |
| NA | Numerická apertura |
| λ | Vlnová dĺžka |
| $\Delta\lambda$ | Šírka pásma |
| atď' | A tak ďalej |
| FBG | Fiber Bragg grating – vláknová Braggova mriežka |
| OTDR | Optical time-domain reflectometry – optická reflektometria v časovej oblasti |
| OFDR | Optical frequency-domain reflectometry – optická reflektometria vo frekvenčnej oblasti |
| PCS | Plastic clad silica – vlákno so skleneným jadrom a plášťom z plastu |
| C-OTDR | Coherent optical time-domain reflectometry – koherentá optická reflektometria v časovej oblasti |
| SOA | Semiconductor optical amplifier – polovodičový optický zosilňovač |
| EOM | Electro-optic modulator – elektro-optický modulátor |
| EDFA | Erbium-doped fiber amplifier – zosilňovač s vláknom dopovaným erbiom |
| BOTDR | Brillouin optical time-domain reflectometer – Brillouinový optický reflektometer v časovej oblasti |
| BOTDA | Brillouin optical time-domain analysis – Brillouinova analýza v časovej oblasti |
| LO | Local oscillator – Lokálny oscilátor |
| DAQ | Data Acquisition Systems – Systém na získavanie údajov |
| SBS | Stimulated Brillouin scattering – Stimulovaný Brillouinov rozptyl |
| DTS | Distribúované teplotné senzory |
| IT | Information technologies – Informačné technológie |
| m | Meter |
| km | Kilometer |
| cm | Centimeter |
| nm | Nanometer |
| ns | Nanosekunda |
| μs | Mikrosekunda |
| ml | Mililiter |