

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

OCHRANA KRITICKÝCH INFRASTRUKTUR POMOCÍ DISTRIBUOVANÝCH TEPLTNÍCH SENZORŮ

CRITICAL INFRASTRUCTURE PROTECTION USING DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Holcman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Informační bezpečnost**

Ústav telekomunikací

Student: Jiří Holcman

ID: 195808

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Ochrana kritických infrastruktur pomocí distribuovaných teplotních senzorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je rozbor problematiky využití optického vlákna jako senzoru teploty (systémy DTS) a srovnání technik měření z pohledu hlavních parametrů (dosah, přesnost, rozlišení, apod.). Na základě teoretického rozboru bude proveden návrh srovnávacího měření systémů DTS. V rámci praktické části bude provedeno ověření parametrů vybraného systému DTS dle vlastní navržené metodiky měření.

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: 8.6.2020

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

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tato diplomová práce má za cíl ukázat možnost praktického použití optického vlákna jako distribuovaného teplotního senzoru. Hlavním cílem je možnost ochrany odpadního potrubí (součásti kritické infrastruktury) proti průsakům, únikům kapaliny, narušení vedení, požáry, zamrznutí apod. V první části práce jsou popsány základní prvky systému pro distribuované měření teploty pomocí optického vlákna jako je optický vláknový senzor, blokové schéma zapojení a teoretický základ, na kterém je měření založeno. Je vysvětlen fyzikální princip snímání teploty za pomoci optického vlákna za pomoci Ramanova zpětného rozptylu světla, ale také Rayleighův a Brillouinův rozptyl, které ovšem v této práci nejsou využity. Dále jsou představeny hlavní výhody DTS systémů jako je možnost detekce na velké vzdálenosti, téměř bezúdržbový provoz s dlouhou dobou životnosti a jednoduchou možností instalace v praxi. Následuje výběr několika světových výrobců a dodavatelů zařízení pro realizaci těchto systémů distribuovaného měření teploty. Pro ověření hlavních parametrů, bylo navrženo a realizováno referenční zapojení. V další části práce je sestaven jednoduchý DTS systém simulující praktickou implementaci na potrubí v laboratorních podmínkách. Na tomto systému byly ověřeny možnosti měřených veličin jako je citlivost ke změnám teploty, rozlišovací schopnost a přesnost měření. Všechny tyto hodnoty byly zaznamenány, graficky znázorněny a vyhodnoceny. Na grafech výsledků byly přehledně vyznačeny a popsány zkoumané veličiny. V závěru práce byly přehledně shrnuty výsledky měření a naznačeny možnosti praktického nasazení k ochraně kritických infrastruktur.

KLÍČOVÁ SLOVA

Detekce průsaků média, distribuovaný teplotní senzor, kritická infrastruktura, optické vláknové senzory, Ramanův rozptyl, srovnávací měření, vyhodnocení základních parametrů praktického měření, výrobci a dodavatelé systémů a zařízení, zabezpečení odpadního potrubí.

ABSTRACT

This master thesis aims to show the possibility of practical use of an optical fiber as a distributed temperature sensor. The main goal is the possibility of protection of waste pipes (critical infrastructure) against leaks, fluid leaks, line disturbances, fires, freezing, etc. The first part describes the basic elements of the system for distributed temperature measurement using optical fiber such as optical fiber sensor, block diagram involvement and theoretical basis on which the measurement is based. The physical principle of temperature sensing using an optical fiber using Raman backscattering of light is explained, as well as Rayleigh and Brillouin scatterings, which, however, are not used in this thesis. Furthermore, the main advantages of DTS systems are presented, such as the possibility of detection over long distances, almost maintenance-free operation with a long service life and easy installation in practice. Next, some global DTS manufactures of equipment for the implementation of these distributed temperature measurement systems. To verify the main parameters, a reference measurement was designed and implemented. In the next part of the work is assembled a simple DTS system simulating the practical implementation of pipelines in laboratory conditions. The possibilities of measured quantities such as sensitivity to temperature changes, resolution and measurement accuracy were verified on this system. All these values were recorded, graphically represented and evaluated. The investigated quantities were clearly marked and described on the graphs of the results. At the end of the work, the results of measurements were clearly summarized and the possibilities of practical use for the protection of critical infrastructures were indicated.

KEYWORDS

Comparative measurement, Critical infrastructure, distributed temperature sensor, optical fiber sensors, evaluation of basic parameters of practical measurement, leakage detection, manufacturers and suppliers of systems and equipment, Raman scattering, security of waste pipes.

HOLCMAN, Jiří. *Ochrana kritických infrastruktur pomocí distribuovaných teplotních senzorů*. Brno, Rok, 67 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Ochrana kritických infrastruktur pomocí distribuovaných teplotních senzorů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Kritická infrastruktura KI	13
1.1 Definice a rozdělení	13
1.2 Základní prvek kritické infrastruktury	14
2 Optické vláknové senzory OVS	15
2.1 Základní rozdělení a zapojení OVS	16
2.2 Rozdělení dle měřené fyzikální veličiny	17
2.3 Optické vlákno	18
2.3.1 Druhy optického vlákna	19
2.3.2 Rozdělení optických vláken dle ITU	20
3 Rozptyl neboli difuze světla	22
3.1 Rayleighův rozptyl	23
3.2 Ramanův rozptyl	24
3.3 Brillouinův rozptyl	25
4 Distribuované teplotní senzory DTS	26
4.1 Historie DTS	26
4.2 Základní popis DTS	26
4.3 Blokové schéma zapojení DTS	27
4.4 Principy měření pomocí DTS	27
4.4.1 Měření za pomoci OTDR	27
4.4.2 Měření za pomoci OFDR	28
5 Výrobci DTS systémů	29
5.1 VIAVI Solutions Inc	29
5.1.1 Kompaktní testovací platforma T-BERD/MTS-6000A	30
5.1.2 Optická testovací jednotka ONMSi/OTU-8000	31
5.2 Bandweaver	33
5.2.1 FireLaser – BW5000-F4	33
5.2.2 T-Laser – TL-01-15-8CH	35
5.3 AP Sensing	36
5.3.1 DTS N45-série	37
5.3.2 SmartVision™ software	38
5.4 Sensornet	39
5.4.1 Sentinel DTS	40

5.4.2	Hallo DTS	41
6	Návrh referenčního měření DTS	42
6.1	Návrh zapojení referenčního měření DTS	42
6.2	Parametry referenčního měření DTS	43
6.3	Blokové schéma referenčního zapojení DTS	43
6.3.1	Zdroj a detektor záření – Viavi MTS-6000A	44
6.3.2	Předřadné a následné optické vlákno	44
6.3.3	Klimatická komora Vötschtechnik VC3 7018	45
6.3.4	Optický vláknový senzor OVS	45
6.4	Postup referenčního měření DTS	46
6.5	Vyhodnocení referenčního měření DTS	47
7	Návrh a realizace praktického měření DTS	52
7.1	Návrh zapojení DTS systému	52
7.2	Parametry měření DTS	53
7.3	Blokové schéma praktického zapojení DTS	53
7.4	Praktické zapojení DTS systému	54
7.5	Postup měření DTS systému	55
7.6	Vyhodnocení výsledků měření	56
8	Možnosti využití DTS k ochraně KI	60
8.1	Praktické možnosti ochrany KI	60
	Závěr	62
	Literatura	64
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	67

Seznam obrázků

1.1	Oblasti kritické infrastruktury	13
2.1	Blokové schéma zapojení přímé metody měření	16
2.2	Blokové schéma zapojení odrazové metody měření	16
2.3	Blokové schéma zapojení extrinzní metody měření	17
2.4	Řez optickým kabelem s jedním vláknem	18
2.5	Jednovidové optické vlákno	19
2.6	Multivídné optické vlákno	19
2.7	Gradientní optické vlákno	20
3.1	Graf rozptylů světla	22
3.2	Schéma Rayleighova rozptylu	23
3.3	Schéma Ramanova rozptylu	24
4.1	Blokové schéma zapojení DTS systému	27
5.1	Přenosná platforma MTS-6000A	30
5.2	Optická testovací jednotka OTU-8000	31
5.3	Distribuovaný teplotní senzor FireLaser – BW5000-F4	34
5.4	Distribuovaný teplotní senzor T-Laser TL-01-15-8CH	35
5.5	Distribuovaný teplotní senzor DTS N45	37
5.6	SmartVision™ software – příklad zobrazení	38
5.7	SmartVision™ software – praktická ukázka trasy	38
5.8	Sentinel DTS přístroj	40
5.9	Hallo DTS přístroj	41
6.1	Blokové schéma zapojení referenčního měření DTS	43
6.2	Přenosná platforma Viavi MTS-6000A	44
6.3	Optické vlákno	44
6.4	Klimatická komora Vötschtechnik VC3 7018	45
6.5	Graf útlumu podél celé délky vedení pomocí OTDR	46
6.6	Společný graf teplotních průběhů na vedení v oblasti 1040-1080 m	47
6.7	Graf teploty po celé délce vedení pro teplotu 0 °C	48
6.8	Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 0 °C	49
6.9	Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 10 °C	49
6.10	Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 20 °C	50
6.11	Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 30 °C	50
6.12	Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 40 °C	51
6.13	Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 50 °C	51
7.1	Blokové schéma zapojení praktického měření DTS	53
7.2	Pohled na potrubí	54
7.3	Pohled na potrubí v řezu	54

7.4	Graf útlumu podél celé délky vedení pomocí OTDR	55
7.5	Graf teplotních průběhů prvního OVS v oblasti 1045–1070 m	56
7.6	Graf teplotních průběhů druhého OVS v oblasti 1045–1070 m	57
7.7	Graf teploty – 4. minuta	58
7.8	Graf teploty – 12. minuta	58
7.9	Graf teploty – 20. minuta	59
7.10	Graf teploty – 28. minuta	59
8.1	Příklad protipožárního využití DTS	60
8.2	Příklad monitorování potrubního vedení pomocí DTS	60
8.3	Příklad využití DTS v energetice	61
8.4	Příklad využití DTS v geotermální, vodní hospodářství...	61

Seznam tabulek

5.1	T-BERD/MTS-6000A, ONMSi/OTU-8000 – obecné parametry[17] . . .	32
5.2	DTS – základní parametry T-BERD/MTS-6000A, ONMSi/OTU-8000[17]	32
5.3	OTDR – základní parametry T-BERD/MTS-6000A, ONMSi/OTU-8000[17]	32
5.4	Tabulka základních parametrů FireLaser – BW5000-F4	34
5.5	Tabulka základních parametrů T-Laser TL-01-15-8CH	35
5.6	Tabulka základních parametrů N45	37
5.7	Tabulka vlastností a výhod Sentinel DTS	40
5.8	Tabulka základních parametrů Hallo DTS	41
6.1	Tabulka základních hodnot srovnávacího měření OTDR	43
6.2	Tabulka základních hodnot srovnávacího měření DTS	43
6.3	Tabulka nastavených a naměřených hodnot	48
7.1	Tabulka základních hodnot praktického měření OTDR	53
7.2	Tabulka základních hodnot praktického měření DTS	53

Úvod

Ochrana kritických infrastruktur pomocí distribuovaných teplotních senzorů je založena na možnosti využití optického vlákna jako snímače teploty. Tento systém se nazývá DTS (Distributed Temperature System). Velkou výhodou tohoto systému je to, že není třeba mnoho teplotních čidel po délce snímaného úseku (často by bylo zapotřebí i několik tisíc čidel), ale jediné optické vlákno umožňuje snímat teplotu podél své délky s přesností 1 m, a to na mnohakilometrových vzdálenostech. Přesnost těchto měření je obvykle 1 °C s rozlišením 0,01°C. Tento systém si lze představit jako velmi dlouhou řadu teplotních čidel nahrazenou jediným optickým kabelem. Fyzikálním principem měření je detekce zpětného rozptylu světla, které vysíláme do optického vlákna. Lze využít buďto Ramanova anebo Brillouinova rozptylu světla při odrazu uvnitř vlákna.

Tato bakalářská práce bude zaměřena na DTS systému pomocí Ramanova rozptylu a jeho praktické aplikaci na vodním hospodářství. V teoretické části práce budou popsány základní principy, na kterých je systém DTS založen, budou popsány základní charakteristiky jednotlivých technik měření. V další kapitole bude uvedeno několik praktických komerčních produktů od různých výrobců, popsány jejich možnosti použití, technické parametry a praktické aplikace.

Také součástí této práce bude realizace praktického zapojení DTS systému. Bude provedeno několik měření s cílem ověření základních charakteristik tohoto systému. Závěrem tohoto měření bude vyhodnocení výsledků.

1 Kritická infrastruktura KI

1.1 Definice a rozdělení

Kritická infrastruktura je zákonem č. 240/2000 Sb.[7] stanovený pojem, který definuje část nějakého systému nebo jeho celek, jehož narušení by mohlo mít za následek vážné ohrožení bezpečnosti státu, narušení zabezpečování základních potřeb obyvatelstva, ohrožení zdraví osob nebo vážný dopad na ekonomiku. KI tvoří prvky kritické infrastruktury, které jsou nezbytné pro jeho fungování. Jsou to fyzické prvky, které tvoří síť zabezpečující fyzické nebo informační služby nebo prostředky, které by v případě napadení, poškození nebo jiném omezení jejich provozu, způsobily újmy na zdraví obyvatelstva, finanční dopady, ekonomické nebo bezpečnostní ohrožení obyvatel nebo státu a v neposlední řadě omezení nebo nečinnost fungování vlády státu nebo jeho složek.

V případě incidentu, který by ohrozil kritickou infrastrukturu tedy dochází k dopadům na politickou nebo sociální situaci státu, dopad na bezpečnost nebo stabilitu státu, hospodářským následkům a z toho všeho vyplývající celkový psychologický dopad na každého obyvatele státu.

Týká se to těchto odvětví[14]:



Obr. 1.1: Oblasti KI

1.2 Základní prvek kritické infrastruktury

Může jim být stavba, prostředek nebo veřejná infrastruktura určených dle odvětví. V současné době je těchto prvků více než 1300 a jejich seznam je veden ministerstvem vnitra (Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR).

Kritéria pro určování prvku KI jsou obsažena v nařízení vlády č. 432/2010 Sb.[8], o kritériích pro určení prvku kritické infrastruktury.

Nejvíce prvků KI je v odvětví komunikačních a informačních systému, jelikož je v této oblasti velký vývoj a stává se nedílnou součástí všech ostatních odvětví. Všechny prvky KI je nutné dobře zabezpečit, aby byla možná neustálá kontrola stavu a zabezpečení. Vyhláška č. 523/2005 Sb.[9] a č. 528/2005 Sb.[10] se stanovují požadavky bezpečnosti informačních a komunikačních systémů a dalších elektronických zařízení.

K tomuto účelu je DTS velmi vhodným řešením v kombinaci s klasickými prvky zabezpečení. Díky své dlouhé trvanlivosti, nenáročnosti na údržbu, snadné instalaci a rychlosti provedení kontroly je DTS nenahraditelným prvkem při ochraně prvků KI.

V této bakalářské práci bude laboratorně realizováno měření na potrubním vedení (KI – odvětví vodní hospodářství - viz. schema obr. 1.1), na němž bude provedena simulace úniku kapaliny z potrubí.

2 Optické vláknové senzory OVS

Vznik optických vláknových snímačů spadá do konce šedesátých a začátku sedmdesátých let minulého století. Je to také období prvních použitelných optických vláken. Jedná se o třetí generaci měřících senzorů. Jejich nástup byl velmi velký, ale vzhledem k ceně zařízení potřebných s jejich zapojení k velkému rozmachu nedošlo. Až v posledních desetiletích dochází k opětovnému nástupu jejich používání.

Velký zájem o ně je zejména způsobem obrovského nástupu využití optické technologie v přenosech dat a tím k zlevňování výroby zařízení potřebných pro tento systém detekce. OVS v podstatě mohou snímat jakoukoliv fyzikální veličinu.[11, 12]

V současnosti je měřenou veličinou například:

- Teplota
- Tlak
- Tah
- Vibrace
- Posuv
- Mechanické napětí

Lze jimi také měřit chemické a biochemické veličiny:

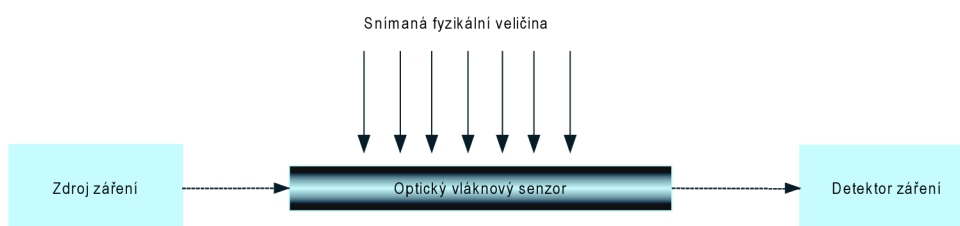
- pH
- parciální tlak kyslíku

V rámci této bakalářské práce se zaměříme na snímání teploty pomocí optického vláknového senzoru metodou založenou na Ramanově rozptylu a v kombinaci OTDR reflektometrie. Jedná se o , u níž se detektorem snímá zpětný odraz se změnou intenzity, která je tepelně závislá ve frekvenčně posunutém pásmu. Měřené místo se určuje za pomoci OTDR.

2.1 Základní rozdělení a zapojení OVS

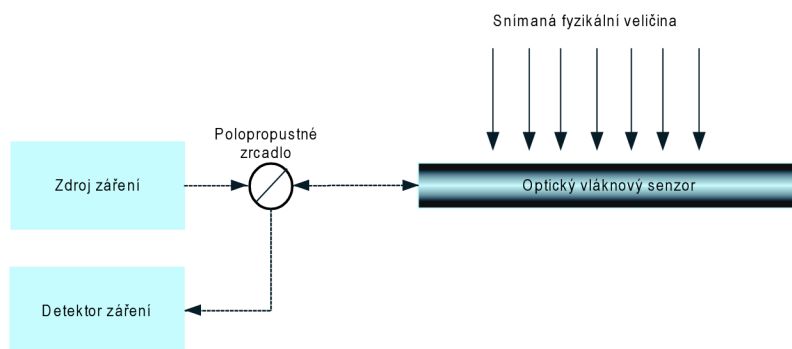
Jako jedno z nejzákladnějších rozdělení je možno považovat rozdělení podle umístění detektoru záření. Jedná se o detekci záření, které projde optickým vláknem na jeho konci je vyhodnoceno anebo detekce zpětně odraženého záření, které se detekuje na stejném konci jako je vstup záření.

Na obrázku 2.1 je znázorněno blokové schéma **přímé** metody měření pomocí optického vlákna. Zdroj záření vysílá světelný impuls do optického vláknového senzoru na který působí měřená fyzikální veličina a ovlivňuje procházející světelný paprsek. Na konci OVS je umístěn detektor, který snímá prošlé světelné záření a dále výsledky může zasílat na vyhodnocení a vizualizaci.



Obr. 2.1: Blokové schéma zapojení přímé metody měření

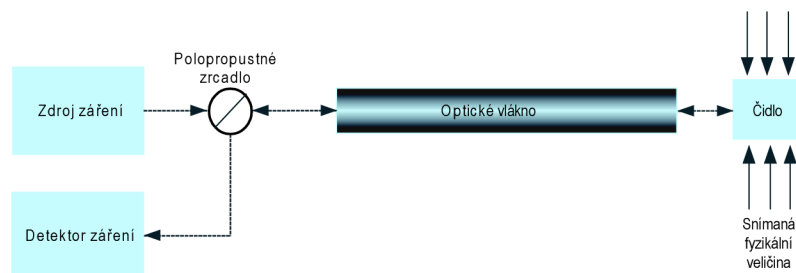
Druhým způsobem měření je **odrazová** metoda neboli reflektometrická znázorněná na obrázku 2.2. Na rozdíl od přímé metody se zde detekuje zpětný odraz záření. Zdroj záření vysílá impuls do optického vláknového snímače, ve kterém dochází působením měřené fyzikální veličiny k rozptylu světelného záření. Toto rozptýlené světelné záření se vrací zpět na začátek OVS a zde je přes polopropustné zrcadlo přeměřováno do detektoru záření.



Obr. 2.2: Blokové schéma zapojení odrazové metody měření

Další možností rozdělení optických vláknových senzorů je dle toho, zda optické vlákno slouží k vlastnímu snímání fyzikální veličiny (intrinzní, viz. obrázek 2.2). Příkladem jsou distribuované senzory, což jsou senzory schopné měřit fyzikální veličiny podél celé délky optického vlákna, což je i případ praktické části této bakalářské práce.

Druhou možností je to, že optické vlákno slouží pouze ke komunikaci s čidlem, které



Obr. 2.3: Blokové schéma zapojení extrinzní metody měření

následně snímá měřenou veličinu, ale samotné optické vlákno se na snímání nijak nepodílí (extrinzní viz. obrázek 2.3). Jedná se o velkou škálu různých senzorů, které jsou ale schopny měřit veličinu pouze v určitém konkrétním bodě a optické vlákno pouze zprostředkovává přenos.

2.2 Rozdělení dle měřené fyzikální veličiny

Za pomoci OVS lze snímat mnoho druhů veličin. Mezi tyto veličiny patří veličiny:

- mechanické (tah, tlak, vibrace...)
- magnetické
- tepelné
- radiační
- chemické
- biologické

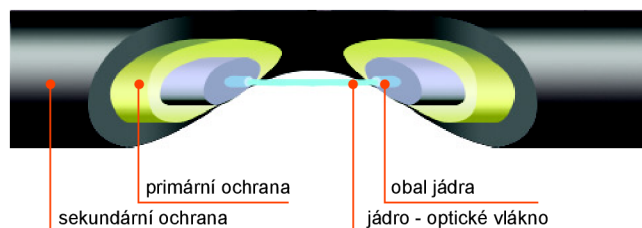
Tato bakalářská práce je zaměřena na použití optických vláknových senzorů založených na intrinzním využití optického vlákna jako snímače teploty. Tato teplota je snímána na základě Ramanova rozptylu světla v kombinaci s OTDR metodou určování místa snímání v OVS. Díky tomu můžeme snímat teplotní profil podél celé délky optického vlákna s krokem 1 metr na velké vzdálenosti (řádově jednotky až desítky kilometru).

2.3 Optické vlákno

Optické vlákno je dielektrické přenosové médium většinou na bázi skla nebo plastu. Signál se přenáší pomocí světla převážně ve viditelné anebo infračervené oblasti spektra ve směru podélné osy vlákna. Hlavní použití optického vlákna je v komunikační technice, ale v posledních desetiletích se rychle rozvíjí i jeho použití jako snímače fyzikálních veličin.

První optické vlákno bylo vyrobeno v Bell Laboratories, USA v roce 1970 s útlumem menším než 20 dB/km. Optické vlákno zásadně změnilo systém přenosu informací a to nejen na velké vzdálenosti.

Principem vedení optického signálu je totální odraz na rozhraní mezi jádrem a obalem vlákna. Vlákno samo o sobě je velice tenké a křehké a je nutno jej obalit obalem a vytvořit z něj kabel použitelný v praxi a chráněný proti vlivům okolí. Obecný průřez optickým kabelem je na obrázku 2.4, kde jsou vidět jednotlivé vrstvy kabelu. Toto se však velmi liší v závislosti na určení použití daného optického kabelu. Směrem od středu je zde jádro, obal jádra neboli plášť, primární obal a sekundární obal.



Obr. 2.4: Řez optickým kabelem s jedním vláknem

Jádro je nejdůležitější část optického vlnovodu. Je buďto skleněné anebo plastové. Pomocí něj se vede světelný paprsek a má větší index lomu než jeho obal. Jeho průměr bývá řádově jednotky až desítky μm .

Obal jádra – plášť zajišťuje totální odraz světla v jádru, protože má nižší index lomu světla než jádro. Díky této vlastnosti je možno optickým vláknem vést světlo. Jeho průměr bývá okolo 125 μm .

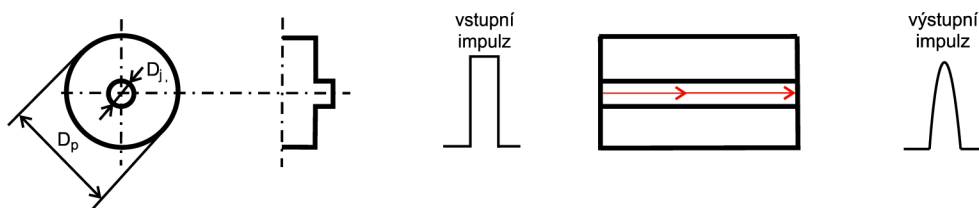
Primární ochrana je tvořena akrylovým lakem. Hlavním úkolem je odolnost vlákna na ohyb a prvotní ochrana jádra. Jeho průměr bývá 250 μm .

Sekundární ochrana je závislá na použití vlákna a není vždy nutná. Slouží jako ochrana před vnějšími vlivy, jako jsou mechanická poškození, povětrnostní vlivy atd. Jeho průměr bývá 900 μm .

2.3.1 Druhy optického vlákna

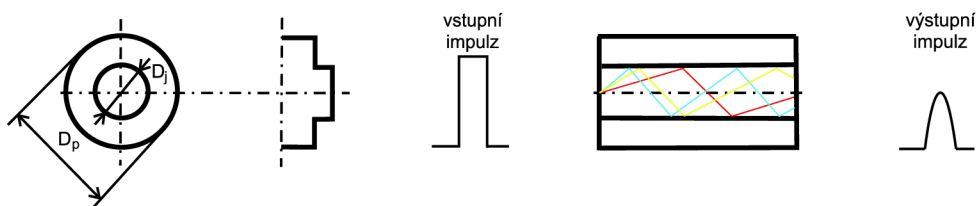
Optická vlákna můžeme dělit dle různých parametrů. Jedním z nich je technologie přenosu světla. Dle tohoto se dělí na jednovidová, multividová a gradientní.[13][12]

Jednovidová vlákna (viz. obrázek 2.5) mají velmi malou disperzi a útlum. V tomto případě se vláknem šíří pouze jeden optický paprsek (vid) a to ve směru vodorovné osy vlákna. Aby se toho dalo dosáhnout, musí se průměr jádra zmenšit na hodnotu jen několika vlnových délek světla. Vnitřní průměr jádra je 7–9 μm a průměr pláště 125 μm . Charakteristické vlastnosti vlákna jsou útlum menší než 0,2 dB/km při vlnové délce 1,55 μm a šířka pásma 10 GHz. Jednovidová vlákna se používají především pro přenos na větší vzdálenosti.[13][12]



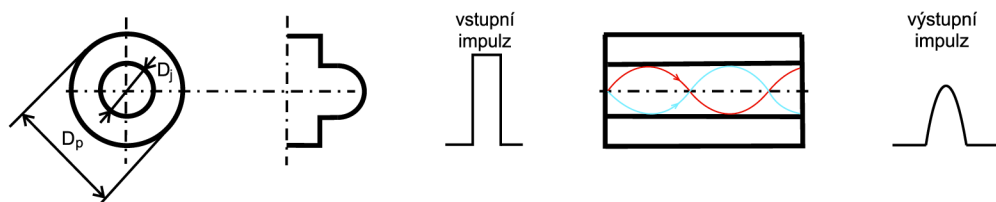
Obr. 2.5: Jednovidové optické vlákno

Multividová vlákna (viz. obrázek 2.6) mají větší disperzi a útlum, což je nevýhodou pro přenosovou kapacitu, ale výhodou je levnější a jednodušší výroba. V tomto případě se vláknem šíří více vidů zároveň, a to ve směru vodorovné osy vlákna. Vnitřní průměr jádra je 50–200 μm a průměr pláště 120–300 μm při šířce pásma 60 MHz. Multividová vlákna se používají především pro přenos na kratší vzdálenosti, lokální sítě atd...[13][12]



Obr. 2.6: Multividové optické vlákno

Gradientní vlákna (viz. obrázek 2.7) mají menší disperzi a útlum. Nevýhodou je výroba jádra s postupnou změnou indexu lomu. Náročnější je také spojování vláken. Oproti předchozím dvěma druhům se zde šíření světla neděje pomocí totálního odrazu, ale za pomoci ohybu světla. Vnitřní průměr jádra je normalizován dle doporučení ITU-T 50 μm , průměr pláště 125 μm při šířce pásma 600 MHz a útlum vlákna 2,5–5 dB/km.[13][12]



Obr. 2.7: Gradientní optické vlákno

2.3.2 Rozdělení optických vláken dle ITU

ITU (International Telecommunication Union) je mezinárodní organizace, u které je možno dohledat doporučení a parametry optických vláken. Tyto doporučení jsou vedeny v oddělení telekomunikačních řešení ITU-T, jsou všeobecně známé a používány. Přenosové média a charakteristiky optických systémů jsou obsaženy v označení G.600–G.699, optická vlákna jsou popsána v rozsahu G.650–G659. Každé doporučení je pro určitý konkrétní typ optického vlákna.

ITU-T doporučení:[6]

- ITU-T G.650.1 a G.650.2 – definice a zkušební metody pro lineární, deterministické atributy single-mode vláken a kabelů
- ITU-T G.651.1 – charakteristiky 50/125 μm multimode optického kabelu...
- ITU-T G.652 – charakteristiky single-mode optického vlákna a kabelu (9/125 μm , čtyři verze: A, B, C, D)
- ITU-T G.653 – charakteristiky single-mode optického vlákna a kabelu (DS-SMF)
- ITU-T G.654 – charakteristiky cut-off shifted single-mode optického vlákna a kabelu (CS-SMF)
- ITU-T G.655 – charakteristiky non-zero dispersion-shifted single-mode optického vlákna a kabelu (NZDS-SMF)
- ITU-T G.656 – charakteristiky vláken a kabelů Non-Zero Dispersion pro W-band Optical Transport
- ITU-T G.657 – charakteristiky ohybových ztrát necitlivých single mode optických vláken a kabelů pro přístup k síti

Nejznámější jednovidová vlákna dle označení[6]:

G.652 – definuje 4 verze (A, B, C, D). Varianty G.652.C a G.652.D umožňují použití v rozsahu vlnových délek mezi 1310 nm a 1550 nm. G.652.D je standardní jednovidové optické vlákno určené pro 10 Gb a 40 Gb systémy.

G.657 – definováno pro optická vlákna obzvláště odolná proti ohybu. Minimální poloměr ohybu byl snížen na 15–5 mm. Vlákno G.657A je kompatibilní s vláknem G.652.

Minimální poloměry ohybu pro vybrané typy optických vláken:

- G.657.B3 – 5 mm
- G.657.A2 – 7,5 mm
- G.657.A1 – 10 mm
- G.652.D – 15 mm
- G.652 – 30 mm

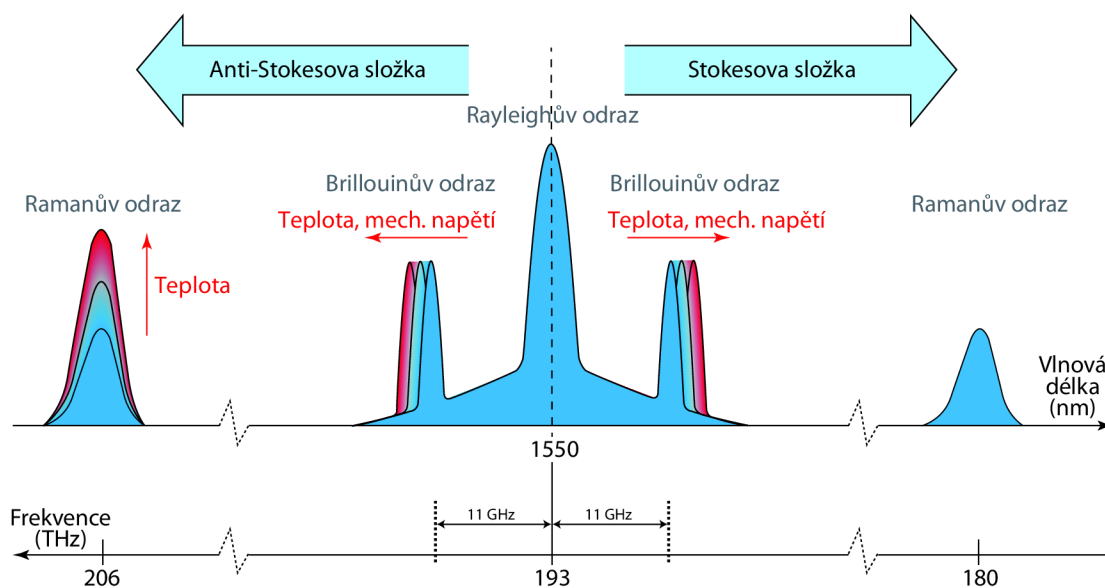
3 Rozptyl neboli difuze světla

Při průchodu světla prostředím dochází k odchýlkám částic světla od přímé cesty, při níž může dojít i ke zvýšení nebo snížení její kinetické energie. Při změně směru hovoříme o rozptylu, zvýšení energie je fluorescence a snížení energie je absorpce světelného záření. Mění se tím také vlnová délka odraženého světla a díky těmto změnám, které jsou závislé na teplotě v daném místě je možno vyhodnotit teplotní profil podél celé délky vlákna s poměrně velkou přesností a rozlišením. K rozptylu dochází v důsledku srážky světelného záření s malými částicemi hmoty (molekulami) v různém skupenství[5].

Rozptyl se ve fyzice rozděluje na pružný a nepružný:

Pružný rozptyl nastává v případě, že nedochází ke změně kinetické energie, částice pouze mění směr pohybu. Příkladem je Rayleighův rozptyl.

Nepružný rozptyl oproti tomu mění kinetickou energii částice, ať už snížení nebo zvýšení. Příkladem tohoto rozptylu je Ramanův, Brillouinův rozptyl.

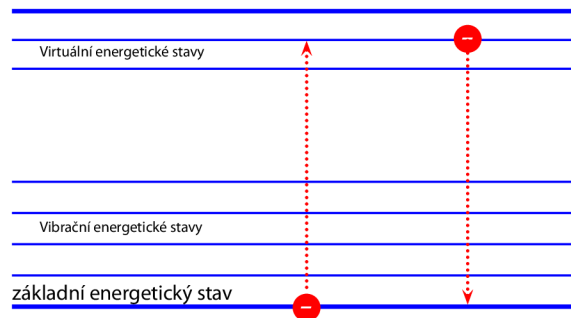


Obr. 3.1: Graf rozptylů světla

3.1 Rayleighův rozptyl

O objev tohoto jevu se zasloužil roku 1899 John W. Rayleigh, který na základě teorie, že světlo je při průchodu vzduchem rozptylováno molekulami vzduchu a na základě toho vypočítal závislost intenzity rozptýleného světla na vlnové délce. Výpočet byl správný i přes to, že se později ukázala nesprávnost předpokladu rozptylu světla na molekulách vzduchu. Začátkem století Albert Einstein, Marian Smoluchowski a Leonid I. Mandelštam zjistili, že k rozptylu světla ve vzduchu nedochází na molekulách vzduchu ale na tzv. fluktuaci jeho hustoty, ke které ve vzduchu dochází díky náhodným pohybům. Tento jev je založen na vlivu změny hustoty prostředí na odraz světla [11].

Rayleighův rozptyl je pružného charakteru. Světelný paprsek procházející optickým vláknem naráží na molekuly které ovlivňuje měřená veličina, dochází k jeho odrazu, při kterém se molekula na chvíli dostane na jinou energetickou hladinu, ale ihned se vrací na původní hladinu. Jelikož nedochází k žádnému pohlcení energie tak se nezmění ani kinetická energie fotonu a tím nedojde ani ke změně vlnové délky paprsku světla (obr. 3.1).



Obr. 3.2: Schéma Rayleighova rozptylu

Lze jej charakterizovat Rayleighovým rozptylovým koeficientem:

$$\gamma_R = \frac{8 \cdot \pi^3}{3 \cdot \lambda^4} \cdot n^8 \cdot p^2 \cdot \beta_c \cdot k \cdot T_f \quad [m^{-1}] \quad (3.1)$$

kde n je index lomu, p je fotoelektrický koeficient, β_c isotermální stlačitelnost, k je Boltzmanova konstanta, T_f fiktivní teplota (pro oxid křemičitý 1400 K)

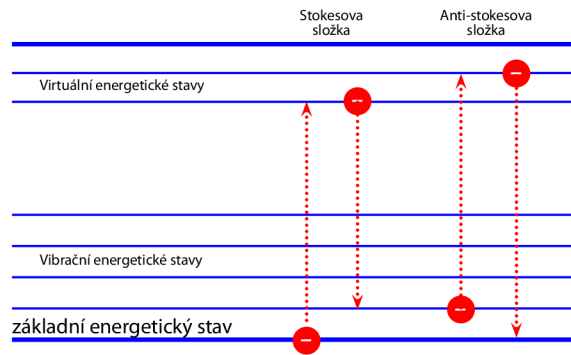
Útlum způsobený Rayleighovým rozptylem:

$$\alpha_R = \frac{C_1}{\lambda^4} \quad [dB] \quad (3.2)$$

kde C_1 je koeficient Rayleighova rozptylu ($0,802 \cdot 10^{-27} dB \cdot m^3$) pro křemenné sklo.

3.2 Ramanův rozptyl

O experimentální důkaz tohoto rozptylu se zasloužil roku 1928 indický vědec sir Chandrasekhara Venkata Raman a o dva roky později za něj obdržel Nobelovu cenu za fyziku [11]. Jedná se také o rozptyl světla, které prochází vláknem a zde dochází k jeho interakci s materiálem vlákna. Tento jev je založen na vlivu kmitání molekul v důsledku teploty na odraz světla. Také dochází ke změně kinetické energie a tím také i ke změně vlnové délky světla. Ovšem v tomto případě je nový energetický stav silně závislý na teplotě, a to pouze v anti-stokesové složce, což znamená, že závislost na teplotě má pouze část spektra s kratší vlnovou délkou. Stokesová složka je na teplotě nezávislá. Se změnou teploty se vlnová délka odraženého světla nemění. Rozdíl frekvence původního a odraženého světla bývá v řádech THz (obr. 3.1).



Obr. 3.3: Schéma Ramanova rozptylu

Výkon vyslaného impulsu, při kterém dochází k Ramanovu zpětnému rozptylu lze nazvat kritickým výkonem a je dán vztahem:

$$P_{SRS} = (4,4 \cdot 10^{-3}) \cdot d^2 \cdot \lambda \cdot \alpha_{dB} \quad [W] \quad (3.3)$$

kde P_{SRS} je hodnota kritického výkonu navázaného do optického vlákna, d je průměr jádra optického vlákna, α_{dB} měrný útlum vlákna, λ vlnová délka.

Po odfiltrování důležitých frekvenčních složek se srovnají intenzity Stokesové a Anti-Stokesové složky a z toho výsledná teplota. Poměr intenzit je dán vztahem:

$$\frac{I_{aS}}{I_S} = \frac{(v_0 + v_V)^4}{(v_0 - v_V)^4} \cdot e^{-\frac{\Delta E}{k \cdot T}} \quad (3.4)$$

kde I_{aS} je intenzita pásu v Anti-Stokesově oblasti, I_S intenzita pásu v Stokesově oblasti, v_0 frekvence budícího světelného záření, v_V frekvence Ramanova posunu, e Eulerovo číslo, ΔE rozdíl energií základního a excitovaného vibračně-rotačního stavu, k Boltzmanova konstanta, T termodynamická teplota.

3.3 Brillouinův rozptyl

Tento rozptyl je pojmenován podle francouzského fyzika Léona Brillouina. Jedná se o rozptyl světla, které prochází vláknem a zde dochází k jeho interakci s materiálem vlákna. Tento jev je založen na vlivu napětí ve vlákně na odraz světla. Je zde velice důležitá závislost indexu lomu materiálu na deformaci optického vlákna, ke kterému dochází vlivem tahu, tlaku nebo krutu, nebo akustickými vibracemi procházejícími vláknem, teplotním působením na vlákno [11].

Pokud vláknem prochází světlo a některý z těchto činitelů působí na vlákno dochází k rozptylu světla, který má nepružný charakter a tím se mění energetická hodnota, ale i vlnová délka odražených fotonů. Vznikají tak dvě složky (stokesova a anti-stokesova), které jsou závislé na teplotě a deformaci v okolí vlákna a jsou frekvenčně stejně posunuta od zdrojové frekvence, ale každá opačným směrem. S měnění se deformací nebo teplotou se mění i vlnová délka rozptýleného světla, ale nemění se energie odraženého světla. Rozdíl frekvence původního a odraženého světla bývá v řádech GHz (obr. 3.1).

Stejně jako u Ramanova rozptylu, tak i zde je možno vypočítat hodnotu kritického výkonu, při kterém dochází k rozptylu:

$$P_{SRS} = (4,4 \cdot 10^{-3}) \cdot d^2 \cdot \lambda^2 \cdot \alpha_{dB} \cdot v \quad [W] \quad (3.5)$$

kde P_{SRS} je hodnota kritického výkonu navázaného do optického vlákna, d je průměr jádra optického vlákna, α_{dB} měrný útlum vlákna, λ vlnová délka, v šířka pásma.

4 Distribuované teplotní senzory DTS

4.1 Historie DTS

Základní koncept systému DTS pochází již z 80. let 20. století, ale přes značnou cenovou a technologickou náročnost dochází k většímu rozmachu až v posledních desetiletích. Technologické a materiálové možnosti současnosti nám umožňují stále více uplatňovat tento systém v praxi. Dochází v rychlému nárůstu aplikací a dalších možností využití i v oborech o kterých se dříve ani neuvažovalo. S rostoucím počtem výrobců rychle klesá i finanční náročnost na výrobu a prodej zařízení pro praktický provoz. Vzhledem k požadavkům na monitorování a zabezpečování zařízení se tato technologie stává velmi žádanou a v některých případech i nenahraditelnou díky svým možnostem na rychlé, přesné měření. Také zde hraje roli jednoduchost instalace, dlouhá životnost a nenáročná údržba systému DTS.[2]

4.2 Základní popis DTS

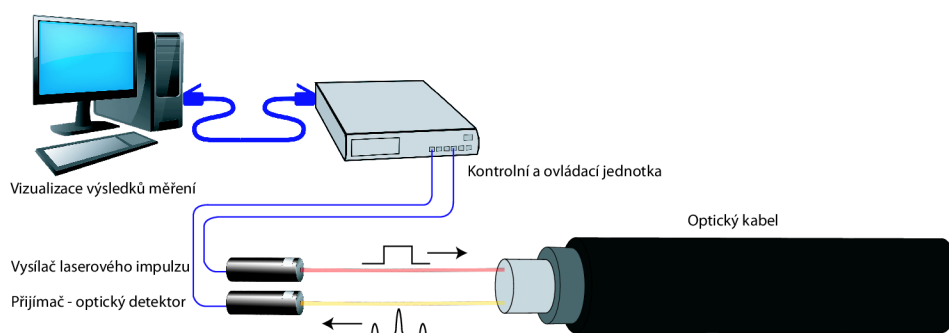
Distribuované teplotní senzory jsou typem elektrooptického zařízení, které nám umožňuje snímat teplotu za pomoci OVS optického vláknového senzoru kontinuálně po celé délce optického vlákna, který zde slouží jako snímač nikoliv jako zprostředkovatel komunikace mezi senzorem a čidlem. Principem měření je vyslání krátkého světelného impulsu do OVS a detekci jeho zpětných odrazů (vždy je vyslána série impulsů, pro přesnější vyhodnocení výsledku). Vyhodnocením odrazů dostáváme teplotní profil podél celého vlákna.[12]

Velkou výhodou použití DTS je:

- Odolnost proti elektromagnetickému záření
- Odolnost proti vlivům prostředí
- Snadná instalace OVS k měřenému objektu
- Měření veličin na velké vzdálenosti (kilometry)
- Množství měřených bodů (min. každý 1 m jedna hodnota)
- Rychlost a přesnost měření
- Rychlé a přesné určení místa incidentu (změny teploty, poruchy na kabelu nebo změny tlaku na kabel)

Jednou z nevýhod této metody je vysoká cena použitého elektronického zařízení, sloužícího pro měření.

4.3 Blokové schéma zapojení DTS



Obr. 4.1: Blokové schéma zapojení DTS systému

4.4 Principy měření pomocí DTS

Nejčastěji je pro měření pomocí DTS využívá reflektometrů. Reflektometry pro svou činnost využívají dvou metod. První metodou je OTDR - Optical Time Domain Reflectometry, což je metoda založená na optické reflektometrii v časové oblasti, což je i použito v praktické části realizace zapojení DTS. Druhou metodou je metoda založená na frekvenční oblasti OFDR - Optical Frequency Domain Reflectometry. Dalšími možnostmi rozdělení může být dle způsobu zapojení DTS systému, také dle využití různého druhu rozptylů. Vše je závislé na požadovaných podmínkách, přesnosti, vzdálenostech i měřené veličině.[13][12]

4.4.1 Měření za pomoci OTDR

[13] Je to metoda nejčastěji využívaná pro měření zpětných rozptylů pomocí reflektometru. Díky závislosti času a rychlosti šíření světla nám tato metoda umožňuje stanovit místo, ve kterém dochází k rozptylu. Využívá se dvou základních veličin Rayleighova rozptylu a Fresnelova odrazu. Fresnelův odraz je způsoben průchodem světla rozhraním dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Tento odraz nám může říci, kde ve vlákne je nějaký problém, který je nutno vyřešit, a to ať už je způsobený vnějším vlivem prostředí na vlákno anebo i struktura vlákna jako taková (nečistoty, sváry, spojky...). Díky tomu se dá s přesností 0,5–1 m stanovit místo problému a není nutné celé vlákno vykopat a kontrolovat krok po kroku. Při použití této metody měření je do vlákna vyslán světelný impuls, který vyšle zdroj záření, nejčastěji laser.

Délka tohoto impulsu bývá řádově desítky nanosekund až po desítky sekund a frekvence laseru jsou jednotky kilohertzů. Je to dáno měřenou délkou (čím delší vedení tím také delší světelný impuls). Světelný impuls se šíří vláknem a dochází ke zpětným rozptylům, které vrací část světelné energie zpět na začátek vlákna. Zde díky optickému děliči dochází k tomu že zpětně odrazené světlo jde do detektoru a zde je měřeno a výsledky jsou uloženy, aby bylo později možno je vyhodnotit a dále zpracovat. Nevýhodou tohoto měření je to, že v bezprostřední blízkosti přístroje nelze dostatečně přesně provádět měření, a proto se mezi přístroj a vlákno připojuje ještě další vlákno, tzv. předřadné vlákno. Toto předřadné vlákno nám zajistí, aby měření proběhlo co nejpřesněji, a i v případě, že je OVS poškozen již na začátku, je možno přesně určit kde k poškození došlo. Tento zpětně se šířící světelný impuls lze stanovit dle vzorce[11]:

$$P_b(z) = \frac{1}{2} \cdot P_0 \cdot \Delta t \cdot S \cdot \alpha_r \cdot v_g \cdot e^{(-2 \cdot \alpha_{dB} \cdot z)} \quad [dB] \quad (4.1)$$

kde P_0 je výkon obdélníkového impulsu, Δt šířka obdélníkového impulsu, S koeficient zpětného rozptylu, α_r činitel ztrát Rayleighovým rozptylem, v_g skupinová rychlost šíření signálu, α_{dB} střední hodnota koeficientu útlumu vlákna na délce z v dopředném i zpětném směru.

4.4.2 Měření za pomoci OFDR

U optického impulsu vyslaného do vlákna dochází k rozptylu. Toto rozptýlené záření se vrací na začátek vlákna a při tom je ovlivňováno signálem vysílaným do vlákna. dochází k vzájemnému mísení a tím ke změně spektra signálu v místě, kde na něj působí měřená fyzikální veličina. Toto se snímá a následně vyhodnocuje. Tato metoda je vhodná především na kratších vzdálenostech, což je tam kde by použití metody OTDR bylo nevhodné anebo nemožné.

Metoda měření OFDR se dělí na metodu koherentní (frekvenční posun až 1 kHz na 1 cm optického vlákna) a nekoherentní (využívá frekvenční modulaci amplitudově modulované nosné vlny, přímou modulaci polovodičového laseru nebo použití externích amplitudových modulátorů).[11]

5 Výrobci DTS systémů

V této kapitole bylo vybráno pět významných světových výrobců a dodavatelů systému DTS. Je zde uvedena stručná charakterizace firmy a vybrán jeden produkt z oblasti měření teploty pomocí distribuovaného teplotního senzoru, včetně základních parametrů.

5.1 VIAVI Solutions Inc



VIAVI Solutions[16], dříve JDSU, byla založena v roce 1923 jako evropská společnost Wandel a Goltermann. Dodává špičková síťová řešení pro poskytovatele telekomunikačních služeb, výrobce zařízení, podniky a subjekty v oblasti státní správy a avioniky. Divize optických speciálních produktů je známá odborností v oblasti pigmentových materiálů proti padělání, 3D snímání a optických filtrů.[16]

Network and Service Enablement Oblast NSE (Network and Service Enablement) je založeno na výzkumu v oblasti měření optických vláken, která přispívá k úspěchu v dodávkách 5G sítí náročných na optická vlákna. Mezi hlavní NSE patří:

- Testování a certifikace sítě
- Testování, kontrola a charakterizace vláken
- Aktivace a zabezpečení síťových služeb
- Správa výkonu sítě
- Síťová inteligence a záruka
- Forenzní zabezpečení sítě

Optické zabezpečení a výkon – OSP (Optical Security and Performance)

Pokrývá oblasti speciálních filtrů používaných pro průzkum vesmíru, inkousty a textilie pomáhající chránit světovou měnu před padělateli, až po 3D snímání. Mezi hlavní oblasti VIAVI OSP patří:

- Optické filtry (včetně 3-D snímacích filtrů)
- Bezpečnostní technologie proti padělání
- Miniaturní spektroskopie
- Pigmenty se speciálními efekty a vlastní barva
- Velkoplošná optika

5.1.1 Kompaktní testovací platforma T-BERD/MTS-6000A

T-BERD/MTS-6000A[17] je kompaktní a lehká přenosná testovací platforma navržená pro všechny fáze životního cyklu sítě od instalace po údržbu optických sítí. Modulární design T-BERD/MTS-6000A nabízí rozsáhlé portfolio testovacích funkcí pro více síťových vrstev. Jednotný aplikační modul pro více služeb poskytuje integrované řešení pro testy Ethernet, SONET/SDH a vyšší vrstvy. Optické moduly umožňují důkladné testování sítí na krátké, dlouhé vzdálenosti, FTTx, CWDM a vysokorychlostních sítí 40 Gb/s.

Hlavní výhody:

- Více než 100 aplikací v kompaktní, lehké platformě.
- Cloud přes Wi-Fi / 3G / 4G LTE a správa aktiv a dat pomocí Stratasync.
- Více než 80 modulů a možnosti upgradování v terénu.
- Dálkově podporovat pomocí Smart Access Anywhere (SAA)



Obr. 5.1: Přenosná platforma MTS-6000A

Klíčové vlastnosti:

- Hmotnost pouze 2,4 kg.
- Velký 8 palcový transreflektivní barevný displej.
- Intuitivní grafické uživatelské rozhraní s dotykovou obrazovkou.
- Dálkově ovládané (Ethernet/IP) / WiFi / 3G / 4G.
- Rychlý přenos dat přes USB, ethernetový port a 1 GB rozšířenou paměť.
- Vestavěná optická komunikační sada pro komunikaci po optickém vlákne.

5.1.2 Optická testovací jednotka ONMSi/OTU-8000

Automatizujte monitorování optické sítě pomocí modulární automatizované zkušební jednotky OTDR namontované na stojanu, která nabízí širokou škálu modulů OTDR pro provádění tradičních tras OTDR a měření DTS a DTSS (Distribuovaná teplota a napětí).

Optická testovací jednotka OTU-8000[17] kombinuje optickou reflektometrii v časové doméně (OTDR) a technologii optického přepínání a zajišťuje nepřetržité monitorování více vláken kdekoli v síti. Platforma OTU-8000 je plně modulární a umožňuje využití mnoha vlnových délek a dynamických rozsahů za účelem optimalizace monitorování vláken pro měnící se sítě.

OTU-8000 spolupracuje s řešením VIAVI ONMSi a SmartOTU.

Výhody:

- Zajišťuje nepřetržitě dobrý servis při výstavbě, aktivaci služby i mimo ni
- Předpokládá přerušení služby detekcí degradace vláken dříve, než ovlivní službu
- Snižuje MTTR lokalizací optických chyb v minutách namísto hodin
- Ochrana infrastruktury moduly DTS a DTSS k detekci změn napětí a teploty

Aplikace:

- Monitorování vláken pro poskytovatele služeb, obslužné programy a poskytovatele temných vláken
- FTTx zkoušky konstrukce, zajištění a údržby
- Detekce odposlechu vláken pro kritické aplikace



Obr. 5.2: Optická testovací jednotka OTU-8000

Klíčové vlastnosti:

- Přepínatelná škálovatelnost až do 1080 portů
- Přístup přes webový prohlížeč
- Oznámení e-mailem a SMS
- Škálovatelné a modulární až do 2RU
- Nízká spotřeba energie

Parametr	Přenosné MTS/TB6000	Rack ONMSi/OTU-8000
Hmotnost	3,4 kg s modulem	méně než 15 kg
Napájení	AC 110/220 V	-20 až -72VDC
Spotřeba	nižší než 50 W	nižší než 50 W
Provozní teplota	0 °C až + 40 °C	5 °C až 45 °C
Rozhraní 10/100/1000baseT	1RJ45 Ethernet	2RJ45 Ethernet
Vnitřní úložiště	SATA HDD 250 GB	SSD 4 GB (až 32 GB)
Obrazovka	Ano (10,4" bar. dotyk. TFT)	Ne

Tab. 5.1: T-BERD/MTS-6000A, ONMSi/OTU-8000 – obecné parametry[17]

Třída bezpečnosti laseru	1
Rozsah měření	až 80 km
Doba měření	od 15 s do 5 hodin
Prostorové rozlišení (IEC 61757)	od 1 m
Prostorový krok (rozlišení vzorkování)	min. 8 cm
Rozsah měřených teplot	-200 °C až +700 °C v závislosti na OVS
Přesnost teploty (IEC 61757)	0,5 °C

Tab. 5.2: DTS – základní parametry T-BERD/MTS-6000A, ONMSi/OTU-8000[17]

Vlnové délka	1550/1625 nm
Dynamický rozsah	36 dB
Šířka optického pulzu	5 ns až 1 μ s
Mrtvá zóna události	0,6 m
Útlumová zóna	3 m

Tab. 5.3: OTDR – základní parametry T-BERD/MTS-6000A, ONMSi/OTU-8000[17]

5.2 Bandweaver



Společnost Bandweaver[18] byla založena roku 2002. Založil ji Howell Zhao. Bandweaver. V současnosti má kanceláře a testovací místa po celém světě, ve Velké Británii, USA, na Středním východě a v Asii a síť mezinárodních spolupracovníků a partnerů. Její systémy se používají k monitorování, zabezpečování a udržování bezpečnosti personálu a kritických aktiv po celém světě a jejich technologie byla nedílnou součástí několika prestižních projektů, včetně Pekingských olympijských her v roce 2007, projektu Lincs Wind Farm (UK) a nedávno summitu G20.

V průběhu let se portfolio inovativních technologií společnosti Bandweaver rozrostlo a nyní pokrývá celou řadu technologií snímání, včetně distribuovaného snímání teploty (DTS) a distribuovaného akustického snímání (DAS) a integrovaných inteligentních inteligentních softwarových řešení.

Hlavní oblasti působení firmy:

- Energie a nástroje
- Protipožární zabezpečení
- Potrubní vedení
- Ropa a plyn

Mezi hlavní technologie patří:

- Distribuované snímání teploty
- Distribuované akustické snímání
- Tepelný rating v reálném čase

5.2.1 FireLaser – BW5000-F4

FireLaser[18] je systém lineárního detektoru tepla speciálně navržený pro použití v aplikacích detekce požáru se zvláštním nebezpečím.

Systém distribuovaného snímání teploty FireLaser (DTS) se připojuje k distribuovanému optickému kabelu (FireFiber) a určuje údaje o teplotě a vzdálenosti v tisících bodech po délce kabelu. Kabel z optických vláken je nainstalován v majetku, který má být chráněn, a tento kabel funguje jako snímací prvek. Řídící jednotka senzoru FireLaser je odpovědná za generování alarmů na základě vypočteného teplotního profilu. FireLaser DTS proto může detekovat umístění horkého bodu na optickém

kabelu s délkou až 5 km s bezkonkurenční přesností. Systém je schopen sledovat pohyb hot spotu nebo více hot spotů z hlediska fyzické polohy, teploty a také v reálném čase.



Obr. 5.3: Distribuovaný teplotní senzor FireLaser – BW5000-F4

- FireLaser Distribuovaná technologie snímání teploty, Bandweaver
- Vysoce spolehlivá technologie vestavěného systému
- Nákladově efektivní řešení
- Škálovatelnost sítě pro distribuované architektury
- Kabel senzoru vhodný pro použití v nebezpečných oblastech
- Obvodové délky do 5000 m
- Více umístění hotspotů do 1 m
- Inteligentní alarmové algoritmy
- Možnosti rozhraní relé a Modbus

Rozsah měření:	2 x 5000 m
Počet kanálů:	4
Počet zón:	500
Čas měření (na okruh):	6 s
Přesnost teploty:	$<\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Ukázkové rozlišení:	1 m
Prostorové rozlišení:	2 m

Tab. 5.4: Tabulka základních parametrů FireLaser – BW5000-F4

5.2.2 T-Laser – TL-01-15-8CH

Je určen pro průmyslové monitorovací aplikace se středním až dlouhým dosahem (5–30 km), kde je nezbytná spolehlivost, bezpečnost a bezproblémová integrace systému. T-Laser DTS[18] byl navržen s ohledem na bezpečnost a byl testován podle nejpřísnějších norem v oboru. Systém lze použít v mnoha monitorovacích polích včetně:

- Detekce požáru v tunelu
- Monitorování napájecího kabelu
- Ropný vrt (proti proudu a po proudu)
- Sledování potrubí a detekce netěsností přehrady



Obr. 5.4: Distribuovaný teplotní senzor T-Laser TL-01-15-8CH

Vlastnosti a výhody Tento T-laser je součástí příští generace pásmových teplotních senzorů (DTS). Tyto systémy jsou navrženy speciálně pro průmyslové monitorovací aplikace. Mezi hlavní konstrukční vlastnosti a možnosti patří například kompaktnost, nízká spotřeba energie, rychlá odpověď, vestavěné funkce alarmu a relé.

Rozsah měření:	15 km
Rozlišení teploty:	0,5 °C
Přesnost teploty:	$<\pm 1$ °C
Prostorové rozlišení:	1 m
Čas měření:	15 s
Počet kanálů:	8
Počet zón:	500

Tab. 5.5: Tabulka základních parametrů T-Laser TL-01-15-8CH

5.3 AP Sensing



V roce 1999 se od společnosti Hewlett Packard oddělila část pod názvem Agilent Technologies. Tato nová společnost v roce 2007 založila nový obchodní model pod názvem AP Sensing[19] se zaměřením na DTS systémy. AP Sensing nabízí distribuovanou technologii optického snímání (DTS, distribuované snímání teploty, DAS, distribuované akustické snímání, DVS, distribuované snímání vibrací).

Společnost zaměřená odborníky na Raman OTDR / OFDR (DTS), Brillouin OTDR / OTDA (DTSS), koherentní OTDR (DAS), interferometrickém vibračním snímání (DVS) nebo jiné technologie optického snímání. Zabývá se i detekcí požáru ve zvláště nebezpečných oblastech, jako jsou tunely, dopravní pásy, metro, továrny, koberce a letiště, a také potřebami monitorování vysokonapěťových napájecích kabelů pro podzemní kabely, podmořské kabely a propojení.

Jejich řešení se používají pro detekci úniků, TPI (interference třetích stran), zajištění toku a trasování tepla. V průmyslovém odvětví těžby ropy a zemního plynu nabízí zařízení pro sledování výkonu optických vláken.

Mezi významné projekty v historii společnosti patří:

- 2010 - Vybrána pro monitorování a ochranu Eurotunelu, nejdelšího podmořského tunelu na světě.
- 2013 - Royal Mecca Clock Tower si vybere společnost pro detekci tepla.
- 2014 - Společnost představuje špičkové měřicí rozsahy až 50 km jak pro single-mode, tak pro multimode vlákna.
- 2015 - Společnost byla vybrána, aby dodávala systém DTS (Distributed Temperature Sensing) pro sledování nejdelšího podmořského kabelového spojení XLPE mezi Švédskem a Litvou.
- 2016 - Monitoring energetické infrastruktury nově vybudovaného olympijského městského parku v Rio de Janeiro pro letní olympijské hry.
- 2017 - První plně integrovaný podmořský a zemní kabel na světě s monitorovacím systémem napájecích kabelů DAS a DTS. Větrná farma na moři o výkonu 400 MW je připojena pomocí 36 km dlouhého, třífázového podmořského kabelu k pobřeží.
- 2018 - Nejpokrokovější DTS v tomto odvětví, s novými úrovněmi snímání teploty a monitorování majetku, hraničními limity času, prostoru a přesnosti.

5.3.1 DTS N45-série

Nový a zcela vylepšený produkt AP Sensing Raman DTS[19] nabízí nejdelší měřicí rozsah a to až 70 km. Také nejlepší výkon při kratších vzdálenostech s prostorovým rozlišením 0,5 metru a rychlou dobou měření až 1 sekunda.



Obr. 5.5: Distribuovaný teplotní senzor DTS N45

Vlastnosti a výhody Tento produkt je navržen pro velmi náročné aplikace s důrazem na dlouhou životnost, spolehlivost a maximální zabezpečení, které prověřila i NASA. VxWorks je operační systém v reálném čase používaný na kritické aplikace, např. v leteckém průmyslu. Tyto systémy charakterizují následující vlastnosti:

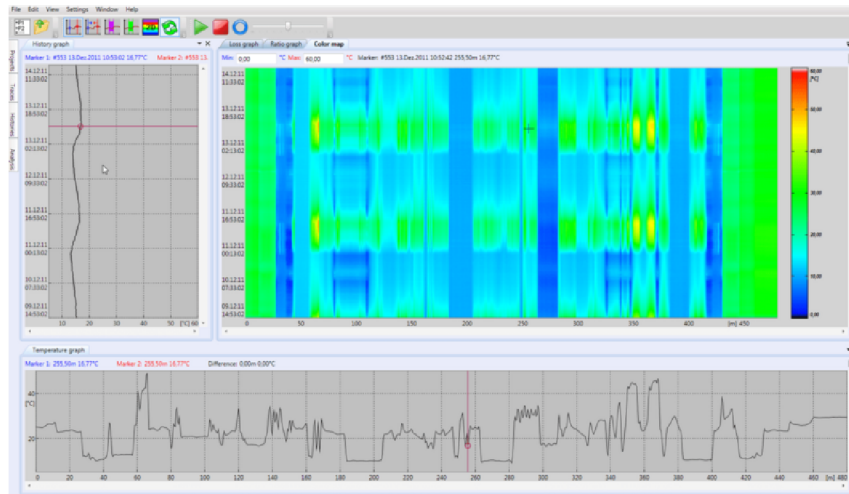
- Kompaktní provedení
- Stabilita měření
- Intuitivní ovládání
- Rychlá odpověď
- Velmi dobré zabezpečení

Rozsah měření:	až 70 km
Rozlišení teploty:	0,5 °C
Přesnost teploty:	$< \pm 1$ °C
Prostorové rozlišení:	0,5 m
Čas měření:	až 1 s
Počet kanálů:	12

Tab. 5.6: Tabulka základních parametrů N45

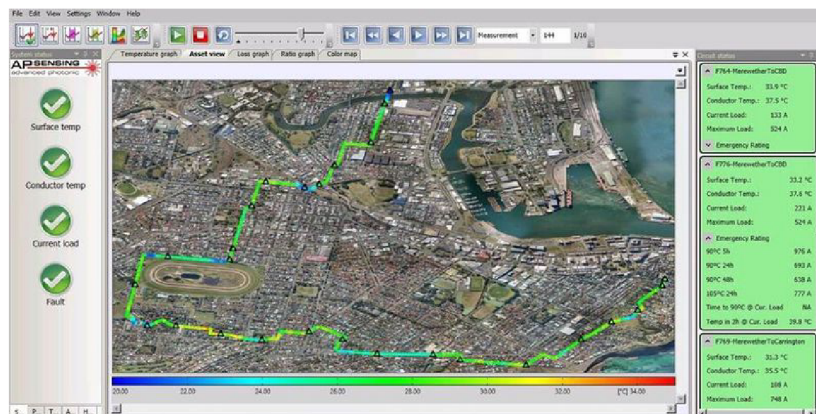
5.3.2 SmartVision™ software

Tento speciální software[19] zpracovává data a umožňuje grafické znázornění a analýzu výsledků. Spojuje data z více zařízení, jako jsou DTS, DAS, DVS, CCTV kamery a další senzory, ukládá je do centrální databáze a zpřístupňuje je pro analýzu a hlášení různým uživatelům z různých míst. Poskytuje schematickou vizualizaci připojených zařízení pro snadnou orientaci a okamžitý stav všech nakonfigurovaných nástrojů. Automaticky detekuje více umístění hotspotu nebo události TPI (inter-



Obr. 5.6: SmartVision™ software – příklad zobrazení

ference třetích stran), podává varování při překročení kritických limitů, a vytváří teplotní profily podél měřených tras. Je vysoce spolehlivý a používá přísné metody opětovné validace k neustálému ověřování, že jeho bezpečnostní funkce fungují správně. Lze jej také přímo propojit s platformou SCADA.



Obr. 5.7: SmartVision™ software – praktická ukázka trasy

5.4 Sensornet



Společnost byla založena v roce 1998 dvěma odborníky na optickou vlákna v Londýně, zpočátku se etablovala jako poradenská firma a zahájila vývoj Sentinel DTS a distribuovaného snímače napětí (DTSS). V roce 2002 byl jejich produkt uveden na trh.

Dnes Sensornet[20] poskytuje nejpokročilejší řešení pro sledování aktiv na světě pomocí systémů pro měření teploty a deformací v reálném čase. Poskytuje kompletní balíček digitálního monitorování pro globální ropný a plynárenský, energetický a environmentální průmysl.

Mezi první světové novinky a technologické milníky patří:

- První DTS, který pracoval v podmínkách -40 až $+ 65$ °C (Oryx DTS, 2008)
- První instalace DTS se systémem Inflow Control Device (ICD) (2008)
- První DTS nainstalovaný v Maximum Reservoir Contact (MRC) well (2008)
- Nejjemnější teplotní rozlišení $<0,01$ °C ($0,004$ °C měřeno v ropné vrtu)
- První instalace přepravního systému DTS s krytem (2007)
- Pouze systém DTS s dosahem >45 km - multimodové vlákno (od roku 2015)
- První distribuované měření dynamického napětí - frekvence: 10 Hz
- Pouze teplotně nezávislé čidlo distribuovaného tenzoru
- Pouze systém DTS certifikovaný pro SIL2

Společnost Sensornet vyvinula řadu špičkových systémů DTS (Distributed Temperature Sensing), jejichž řešení DTS zajišťuje, že jsou splněny všechny požadavky na monitorování. V závislosti na konkrétních požadavcích může měřit teploty s rozlišením $0,010$ °C v kroku 1 metr podél kabelu optického vlákna až na vzdálenost 45 km v obou směrech (tj. s celkovým dosahem 90 km od jedné jednotky DTS).

Rozsah aplikací je prakticky neomezený - s monitorováním nejdrsnějších situací, jako je korozivní prostředí, vodíková atmosféra a teploty do 700 °C. Systém je umístěn v samostatné jednotce s počítačem a pracuje s uživatelsky přívětivým softwarovým rozhraním, díky čemuž je snadno použitelný a snadno přenosný systém.

5.4.1 Sentinel DTS

Distribuovaný teplotní senzor Sentinel[20] je technologicky vyspělý a spolehlivý distribuovaný teplotní senzor s rozlišením teploty jemnějším než 0,01 °C.

Tento systém DTS byl navržen s ohledem na bezpečnost a testován podle nejprísnějších norem v oboru. S přidáním multiplexovacího modulu může být snadno nakonfigurován tak, aby produkoval více měření na dvou koncích. Uživatelem konfigurovatelné zóny a funkce alarmů jsou k dispozici také pro širokou škálu aplikací.

Řada produktů Sentinel DTS pokrývá až 45 km, je navržena pro multimódové nebo singlemódové optické kabely a nabízí specifická řešení pro aplikace v hutnictví do dolů.



Obr. 5.8: Sentinel DTS přístroj

Vlastnosti a výhody:

Vysoký výkon	Rozlišení teploty až 0,004 °C.
Jemné prostorové rozlišení	1 m prostorové rozlišení, přesná lokalizace.
Vysoká rychlost měření	Měření kratší než 10 sekund umožňující sledování přechodných událostí v reálném čase.
Intuitivní konfigurace	Intuitivní uživatelské rozhraní umožňující rychlou a jednoduchou kalibraci a konfiguraci. Oboustranná kalibrace pomocí multiplexeru.
Dálkové ovládání	Vzdáleně ovládání přes rozhraní Ethernet.
Více kanálů	4, 8 a 16 kanálové multiplexery.
Funkce budíku	Zóny a alarmy připojitelné k SCADA systémům. Datové formáty MODBUS / OPC. K dispozici je také reléový kontaktní modul.

Tab. 5.7: Tabulka vlastností a výhod Sentinel DTS

5.4.2 Hallo DTS

Pro aplikace v průmyslovém monitorování, kde je nezbytná spolehlivost, bezpečnost a bezproblémová integrace systému, je kompaktní, uživatelsky přívětivý Halo-DTS[20] s nízkou spotřebou energie. Systém je vybaven vestavěným multiplexním modulem (4 kanály), který umožňuje až 4 jednotlivá měření nebo 2 měření na dvou koncích na vzdálenost až 4 km. Uživatelem konfigurovatelné zóny a funkce alarmů jsou k dispozici také pro širokou škálu aplikací. Systém je v samostatné jednotce, která obsahuje jak snímací optoelektroniku, tak zabudovaný počítač. Systém pracuje s intuitivním softwarovým rozhraním (založeným na OS Windows), díky čemuž je systém snadno použitelný. Systém byl navržen s ohledem na bezpečnost a byl testován podle nej přísnějších norem v oboru.



Obr. 5.9: Hallo DTS přístroj

U systémů Sensornet DTS (stejně jako u všech systémů DTS) existuje kompromis mezi rozlišením teploty, prostorovým rozlišením, rozsahem a rychlostí měření (např. čím více času umožníte DTS získat data, tím lepší je rozlišení teploty).

Rozsah měření:	až 4 km
Rozlišení teploty:	0,5 °C
Prostorové rozlišení:	2 m
Čas měření:	od 15 s
Počet kanálů:	4

Tab. 5.8: Tabulka základních parametrů Hallo DTS

6 Návrh referenčního měření DTS

V praktické části bylo navrženo a realizováno zapojení jednoduchého systému distribuovaného snímání teploty podél optického vláknového senzoru založeného na kombinaci metody OTDR a detekci zpětného Ramanova rozptylu. Na dvou místech byla v teplotně kontrolovatelném prostředí nastavena přesná teplota. Bylo provedeno několik měření OVS a výsledky byly následně vyhodnoceny a graficky zpracovány na konci této kapitoly. Bylo nakresleno a popsáno základní schéma zapojení, jeho jednotlivé prvky a také uvedeny všechny podmínky měření. Cele měření bude probíhat v šesti krocích při teplotách od 0 °C až do 50 °C a to v krocích po 10 °C.

6.1 Návrh zapojení referenčního měření DTS

Referenční trasa DTS systému pro srovnání měření bylo sestaveno z těchto základních prvků:

- Komerční měřicí přístroj od firmy Viavi MTS-6000A.
- Universální kabel LT DryCore, 12 vláken (2x 6 vláken) AW, LSZH jako OVS
- Dvě optická vlákna se základní ochranou (délky 1 km)
- Klimatická komora Vötschtechnik VC3 7018

Jako zdroj optického signálu bylo použito komerčně vyráběného systému MTS-6000A od firmy Viavi, který zároveň slouží i jako detektor zpětného rozptylu a také obsahuje modul pro OTDR metodu detekce a vyhodnocení celé optické trasy. Na něj bylo připojeno jedno optické vlákno o délce 1 km, které slouží jako předřadné vlákno a reprezentuje vzdálenost měřicího přístroje od místa, kde dochází k vlastnímu snímání teploty. Na toto vlákno je pomocí optických spojek připojen vlastní optický vláknový snímač (Universální kabel LT DryCore), který obsahuje 2x6 optických vláken, v tomto případě bylo použito pouze jedno. Tento OVS byl po 2 m veden přes klimatickou komoru ve které byl umístěn 1 m vedení, poté ven z komory a po 3 metrech opět přes klimatickou komoru v níž byl umístěn 1 m. Poslední 3 metry byly opět venku mimo komoru. Na konec OVS byl napojeno druhé optické vlákno o délce 1 km, toto vlákno nebylo nijak ukončeno. Vše je znázorněno na blokovém schématu referenčního zapojení (obr. 6.1).

6.2 Parametry referenčního měření DTS

Základní nastavení měřícího přístroje pro detekci referenční trasy a určení stavu pomocí OTDR metody je v tabulce 6.1. Parametry měření teplotního profilu podél OVS je uveden v tabulce 6.2.

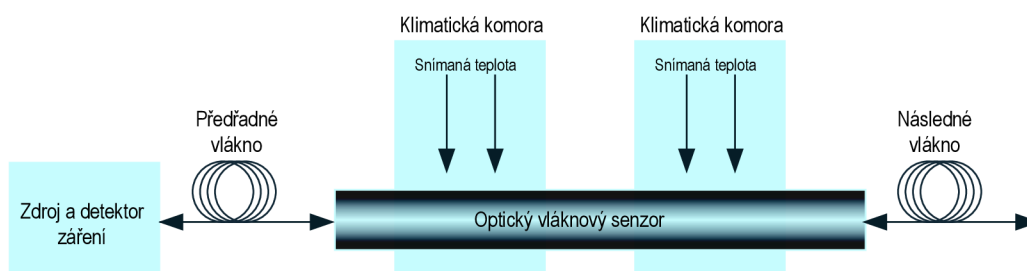
Nastavená délka vedení:	5 000 m
Skutečná délka vedení:	2 117 m
Vlnová délka impulsu	1550 nm
Délka impulsu	5 ns

Tab. 6.1: Tabulka základních hodnot srovnávacího měření OTDR

Nastavená délka vedení:	5 000 m
Vlnová délka impulsu	1650 nm
Délka impulsu	10 ns
Čas měření	5 min.
Délkový krok měření	8 cm
Ukázkové rozlišení:	0,5 m

Tab. 6.2: Tabulka základních hodnot srovnávacího měření DTS

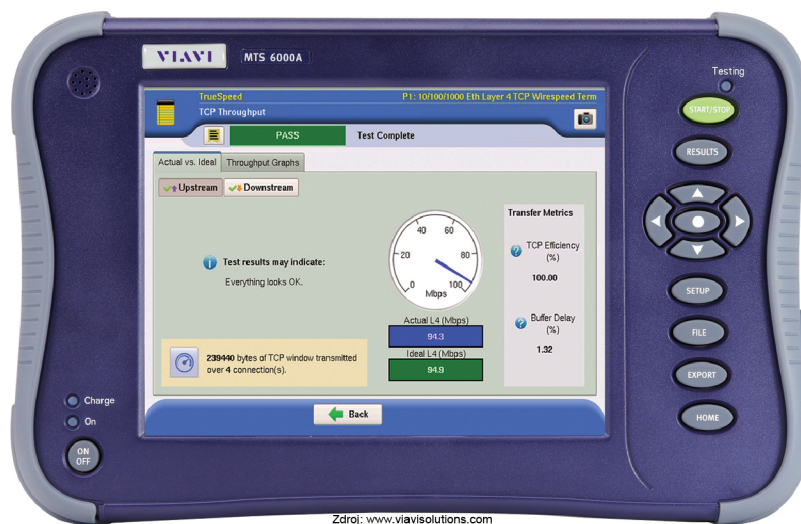
6.3 Blokové schéma referenčního zapojení DTS



Obr. 6.1: Blokové schéma zapojení referenčního měření DTS

6.3.1 Zdroj a detektor záření – Viavi MTS-6000A

Je kompaktní a lehká testovací platforma umožňující rychlé a jednoduché měření. Optické moduly umožňují důkladné testování sítí na krátké, dlouhé vzdálenosti, FTTx, CWDM a vysokorychlostních sítí 40 Gb/s. Výstupem je soubor dat, které je možno dále vizualizovat a analyzovat.



Obr. 6.2: Přenosná platforma Viavi MTS-6000A

6.3.2 Předřadné a následné optické vlákno

Jako předřadného a koncového optického vlákna bylo použito běžné optické vlákno. Jako předřadné je vlákno o délce 1,023 km s útlumem 0,286 dB/km. Koncové vlákno mělo délku 1,056 km a útlum 0,24 dB/km.



Obr. 6.3: Optické vlákno

6.3.3 Klimatická komora Vötschtechnik VC3 7018

Komora[21] slouží k testování vlivu tepelných a klimatických účinků na testované objekty. Přístroj se používá hlavně k získání charakteristik testovaných předmětů při různých teplotách a vlhkosti, testování kvality výroby, hledání poruch a zajištění kvality. Rozměry zkušební oblasti jsou 580 x 450 x 750 mm, teplotní rozsah pro tepelné zkoušky je -72 až +180 °C, teplotní rozsah pro klimatické zkoušky (s vytvářením vlhkosti) je +10 až +90 °C. Rozsah generování vlhkosti je 10 % až 98 %.



Obr. 6.4: Klimatická komora Vötschtechnik VC3 7018

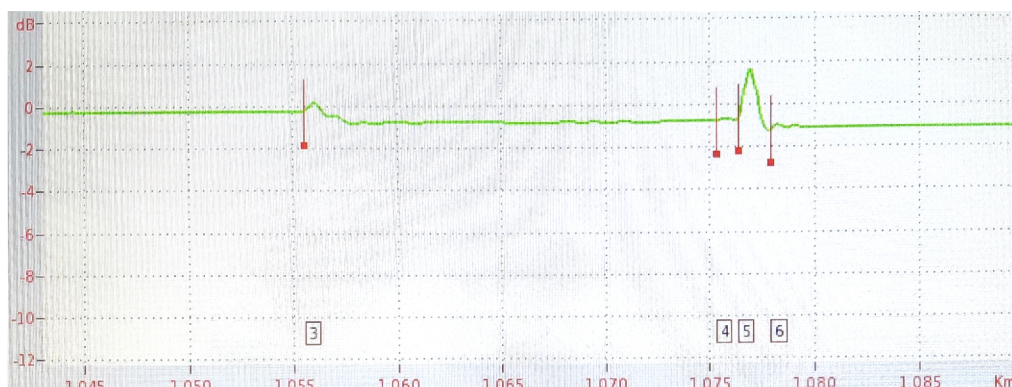
6.3.4 Optický vláknový senzor OVS

Jako snímače teploty je použito dvou optických vláknových snímačů o délce 15 m.

- Universální kabel LS0H AccuDry 2xAW Flex.
- Universální kabel LT DryCore, 12 vláken (2x 6 vláken) AW, LSZH.

6.4 Postup referenčního měření DTS

Cele měření Vybraný systém DTS byl sestaven a byly nastaveny základní parametry měření pro modul OTDR. Bylo provedeno měření pomocí modulu OTDR, nainstalovaného v měřicím systému MTS-6000A, a ověřeno zda je trasa správně zapojena a zda útlumy na trase nezpůsobí problémy při měření (viz. graf 6.5). Na grafu jsou patrné přechody na konektorech (čísla 3, 4, 5 a 6).

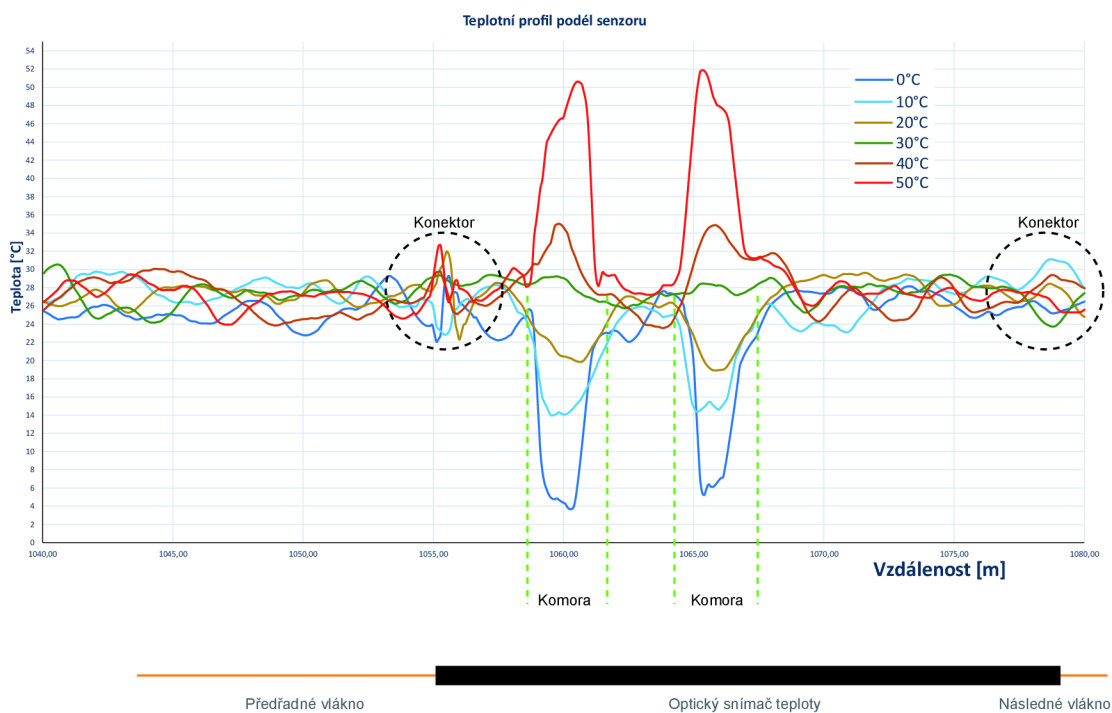


Obr. 6.5: Graf útlumu podél celé délky vedení pomocí OTDR

Byly nastaveny základní parametry měření pro metodu DTS založenou na Ramanově rozptylu do modulu v měřicím přístroji. Klimatická komora byla nastavena na první teplotu - 0 °C. Po nastavení teploty v klimatické komoře na 0 °C byl ponechán celý systém asi 5 minut bez měření, proto aby se teplota rovnoměrně rozprostřela ve vláknu. Poté bylo provedeno měření pomocí přístroje, které trvalo 5 minut. Výsledná série hodnot v podobě textového dokumentu byla uložena v detektoru. Následovalo nové nastavení teploty v krocích po 10 °C až do 50 °C a vždy s časovou prodlevou asi 5 minut bylo provedeno další měření. Jakmile bylo měření ukončeno byly textové soubory s naměřenými hodnotami byly odeslány do počítače. Bylo provedeno vyhodnocení a grafická vizualizace provedených měření. Vyhodnocení a závěr byl uveden na závěr této bakalářské práce.

6.5 Vyhodnocení referenčního měření DTS

Na obrázku 6.6 jsou znázorněny výsledky praktického měření od 0 do 50 °C po krocích 10 °C. Na barevně odlišených průbězích vidíme, že na měřenou teplotu mají vliv i konektory na vedení (černé zakroužkované části na obr. 6.6). Po odečtení hodnot měřené teploty v místech komor (tabulka číslo 6.3) můžeme vidět, že teplota není přesně změřena což je dáno tím, že nastavení komory je v rozsahu 4 °C. Na přesnost měření má také vliv čas, po který měření probíhá (čím delší čas bychom použily tím přesnější výsledek by byl dosažen). Na přesnost má také vliv délka senzoru, umístěného v klimatické komoře (v našem případě 1 metr) ta byla na dolní hranici rozlišitelnosti měřící metody. Pod grafem je schematicky znázorněno zapojení vláken v závislosti na grafu. Ovšem celkově lze říci, že citlivost této metody je velmi dobrá a lze ji velmi dobře využít v praktickém zapojení při monitorování prvků kritických infrastruktur jako jsou produktovody, vodovodní i odpadní vedení, stavby...

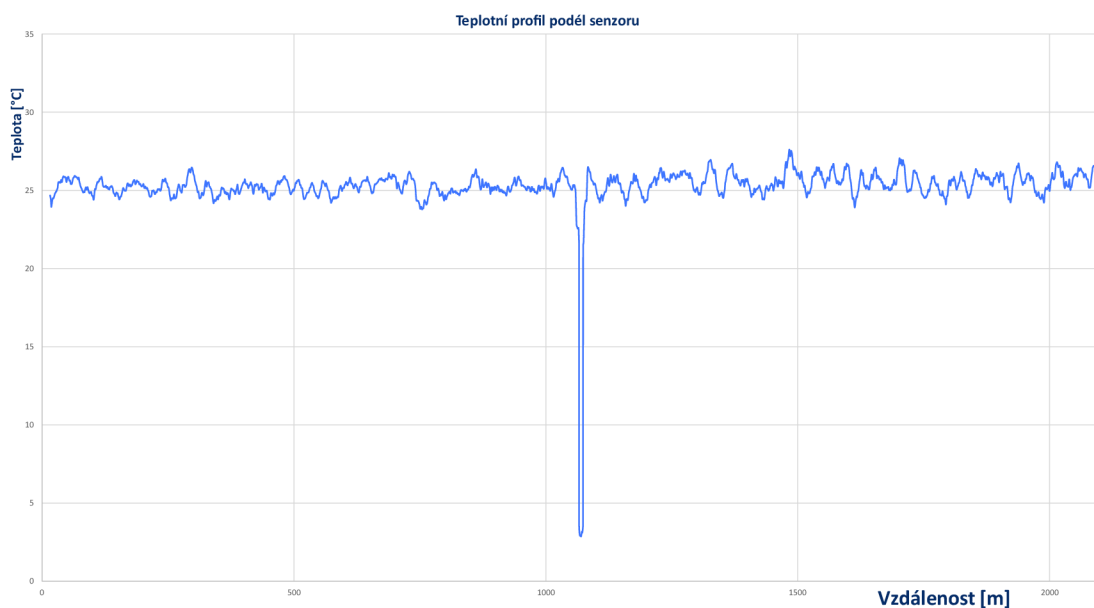


Obr. 6.6: Společný graf teplotních průběhů na vedení v oblasti 1040-1080 m

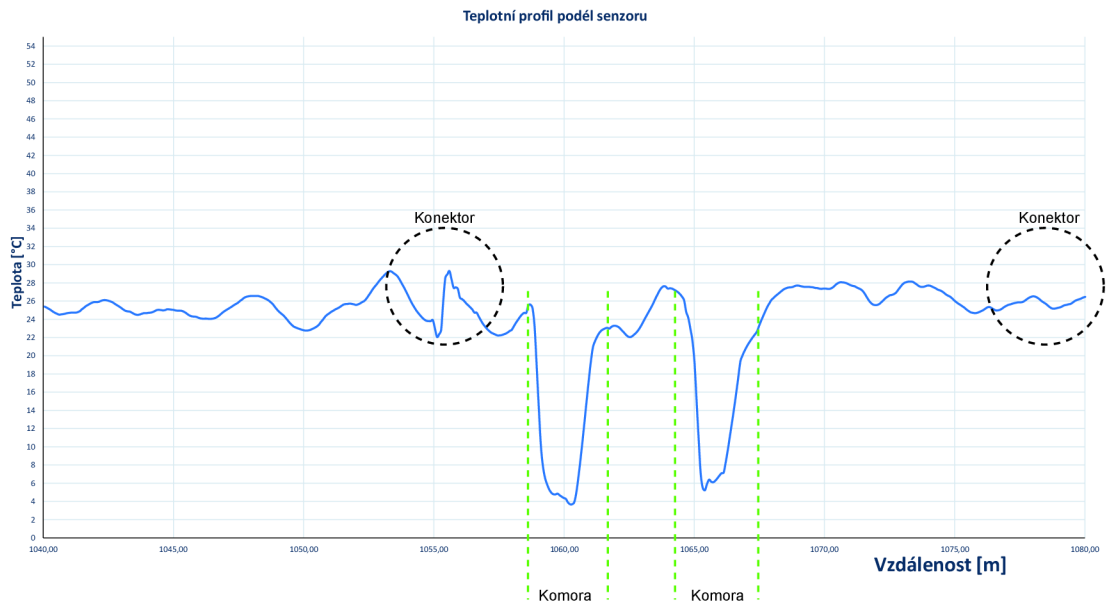
Teplota nastavená	Změřená teplota 1	Změřená teplota 2
2 °C	3,69 °C	5,23 °C
11 °C	13,97 °C	14,41 °C
19 °C	19,84 °C	18,91 °C
29 °C	29,24 °C	29,07 °C
37 °C	35,01 °C	34,87 °C
50 °C	50,63 °C	51,87 °C

Tab. 6.3: Tabulka nastavených a naměřených hodnot

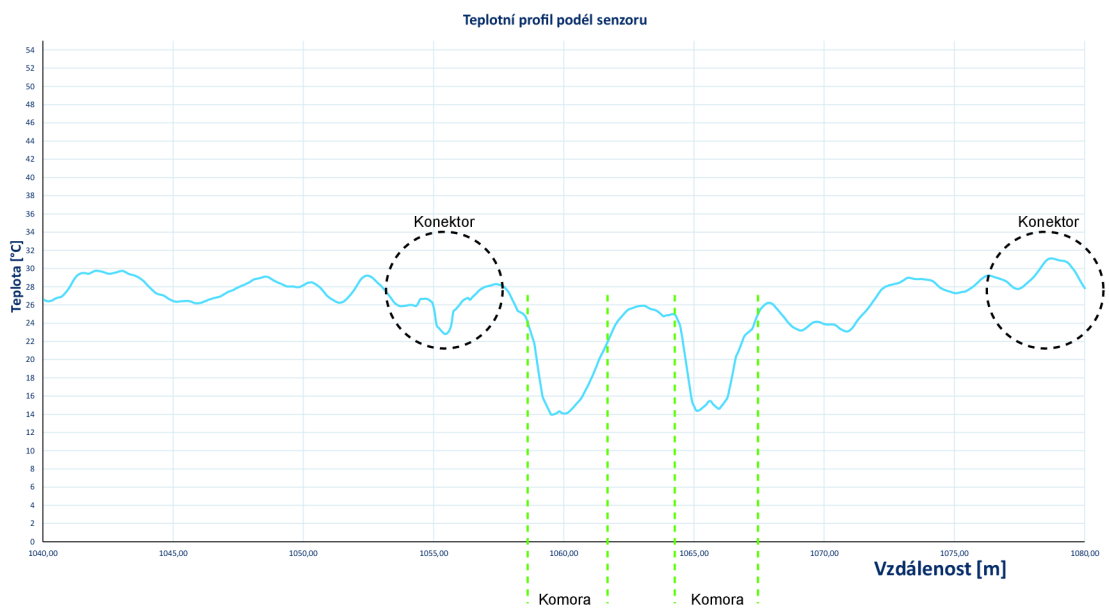
Na celkovém grafu průběhu teploty (obr. 6.7) je znázorněna teplota podél celého vedení optické trasy o délce 2 km. Na průběhu je vidět místo, kde ne vlákno vedeno přes teplotní komoru. V komoře jsou umístěna dvě čisti vlákna, což na grafu není vidět, protože rozlišení grafu je tak malé, že se obě místa spojila v jednu událost zobrazenou výrazným píkem.



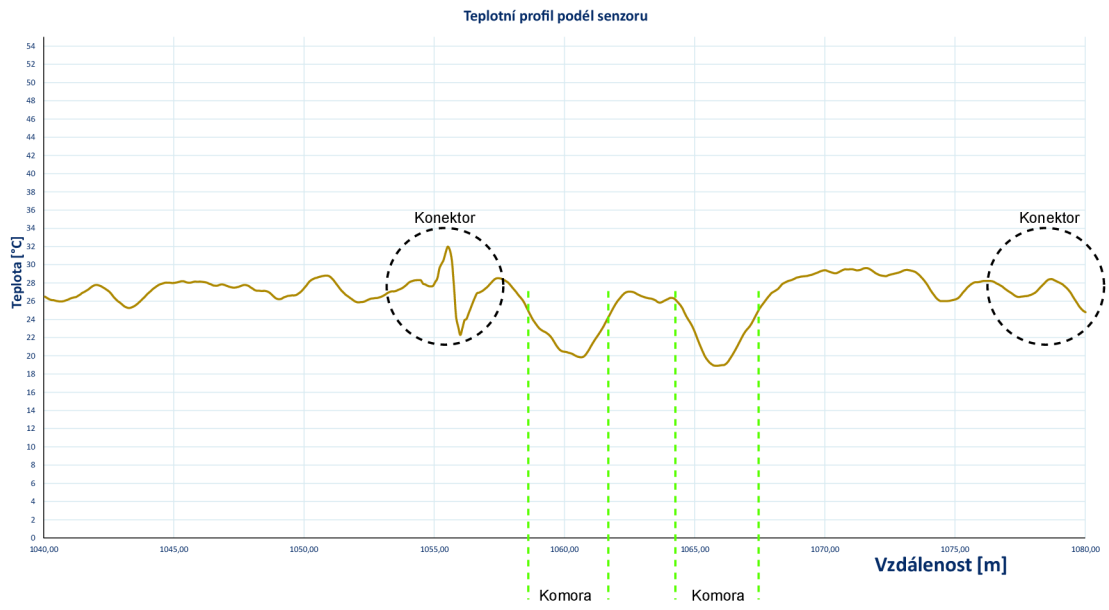
Obr. 6.7: Graf teploty po celé délce vedení pro teplotu 0 °C



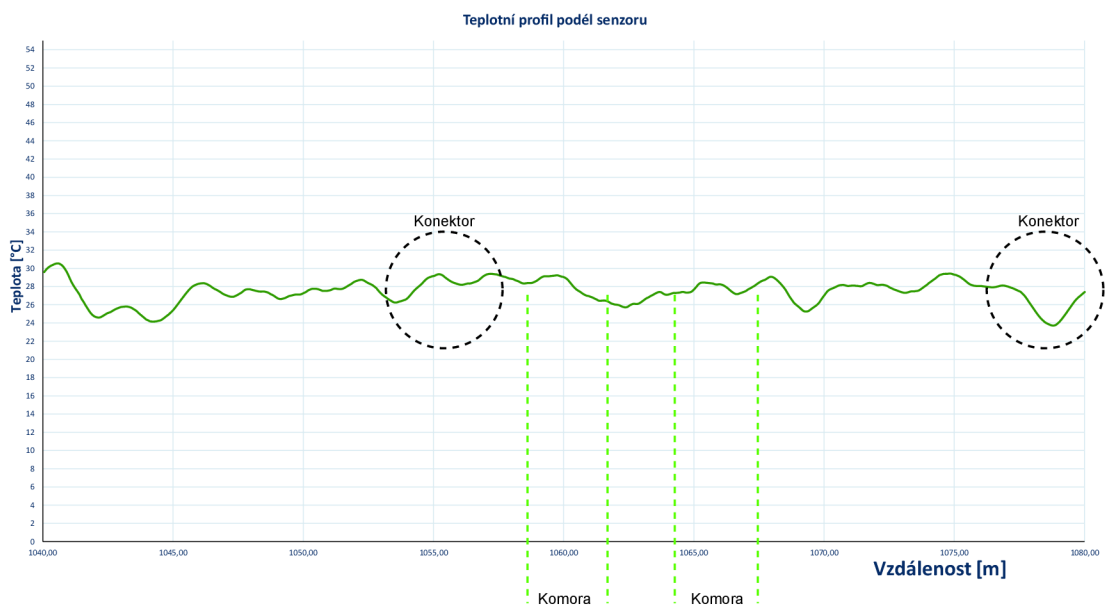
Obr. 6.8: Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 0 °C



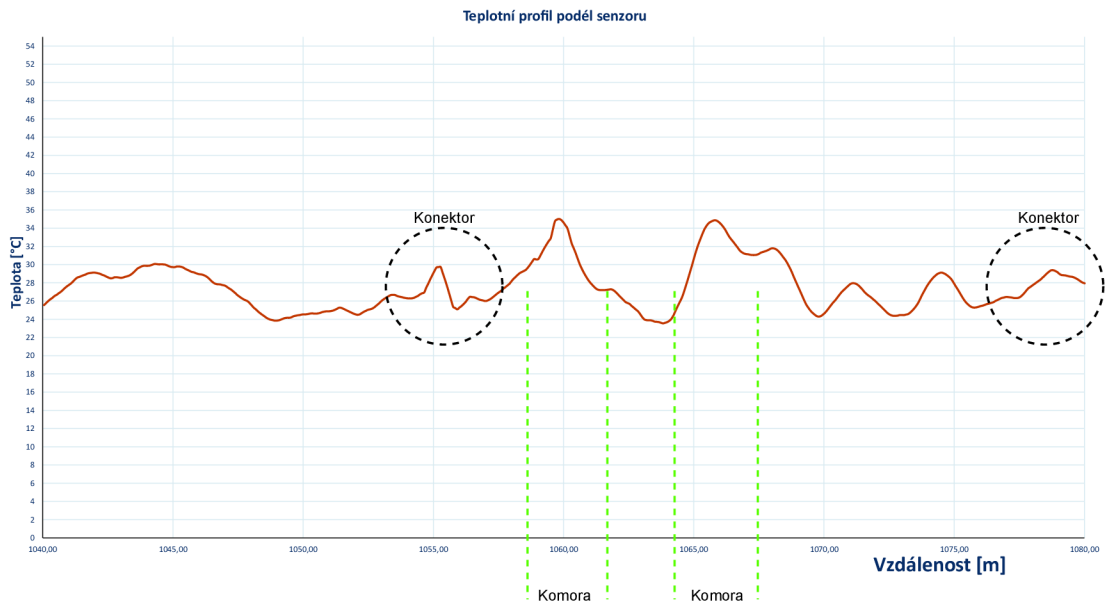
Obr. 6.9: Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 10 °C



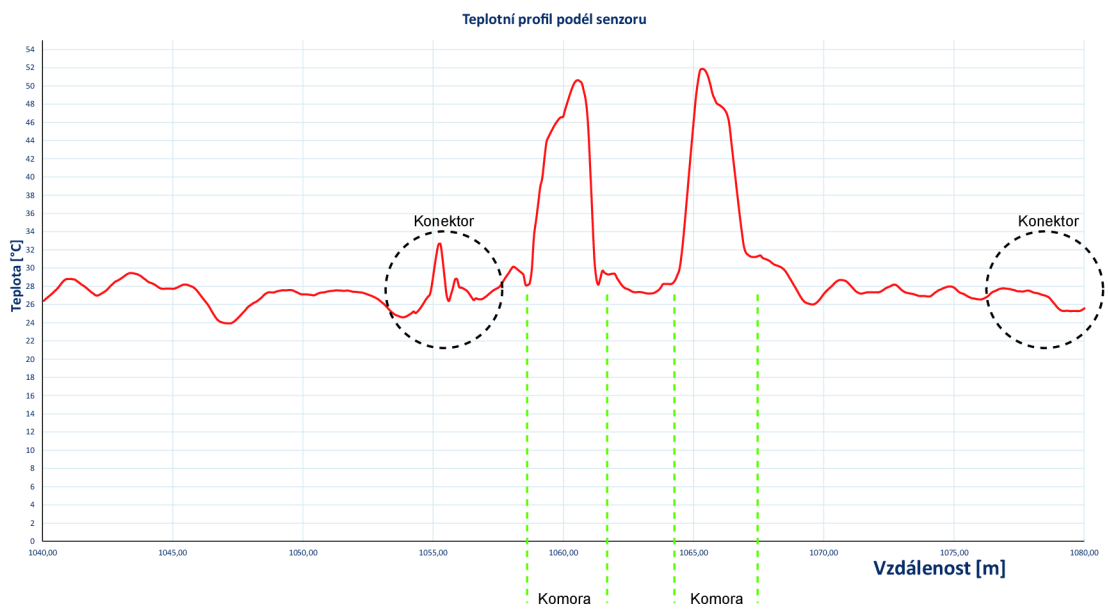
Obr. 6.10: Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 20 °C



Obr. 6.11: Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 30 °C



Obr. 6.12: Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 40 °C



Obr. 6.13: Graf teploty v oblasti 1040–1080 m pro teplotu 50 °C

7 Návrh a realizace praktického měření DTS

Cílem této bakalářské práce bylo ukázat možnost praktického použití DTS systémů v kontrolních systémech kritické infrastruktury, jejich široké možnosti využití. Praktické měření ukazuje možnost instalace DTS systému v odpadním vedení, jeho kontroly zda není porušeno vedení, kontrola změny teploty v případě požáru nebo na přítoku bočním vedení. Toto nám také umožňuje detekovat nelegální přípojku nebo vypouštění odpadů během celé délky vedení kanalizace, což mohou být i řádově kilometry. Pro toto zapojení byla použita plastová trubka s odbočkou, do které byla zavedena hadička s teplou vodou. Tato voda byla pomalu přiváděna do potrubí pro simulaci nelegálního vypouštění odpadu do odpadního řádu. Pomocí měřicího přístroje Viavi byl měřen teplotní profil podél vedení a vyhodnoceno, zda bylo toto "nelegální vypouštění" detekováno.

7.1 Návrh zapojení DTS systému

Praktická trasa DTS systému byla sestavena z následujících komponentů:

- Komerční měřicí přístroj od firmy Viavi MTS-6000A.
- Universální kabel LT DryCore, 12 vláken (2x 6 vláken) AW, LSZH jako OVS
- Dvě optická vlákna se základní ochranou (délky 1 km)
- Plastové potrubí s odbočkou, délka 1,5 m
- Stojan s nádobou na teplou vodu o objemu 1,5 litru a možností regulace rychlosti výtoku

Zdroj optického signálu byl i zde použito komerčně vyráběný systém MTS-6000A od firmy Viavi, který zároveň slouží i jako detektor zpětného rozptylu a také obsahuje modul pro OTDR metodu detekce a vyhodnocení celé optické trasy. Optické vlákno o délce 1 km bylo použito jako předřadné vlákno. Na konci tohoto vlákna byl připojen pomocí optické spojky připojen vlastní optický vláknový snímač OVS (v našem případě dva druhy pro možnost srovnání výsledků), které obsahují několik optických vláken. Toto měření bylo provedeno na jednom z vláken, ostatní byla nevyužita. Tento senzor byl veden skrz plastové potrubí, v němž byl uchycen na spodní straně trubky. Na konec tohoto OVS bylo napojeno skrze optickou spojku další optické vlákno, simulující následné vlákno, o délce 1 km. Vše je znázorněno na blokovém schématu referenčního zapojení (obr. 7.1).

7.2 Parametry měření DTS

Základní nastavení měřícího přístroje pro detekci praktické trasy a určení stavu pomocí OTDR metody je v tabulce 7.1. Parametry měření teplotního profilu podél OVS je uveden v tabulce 7.2.

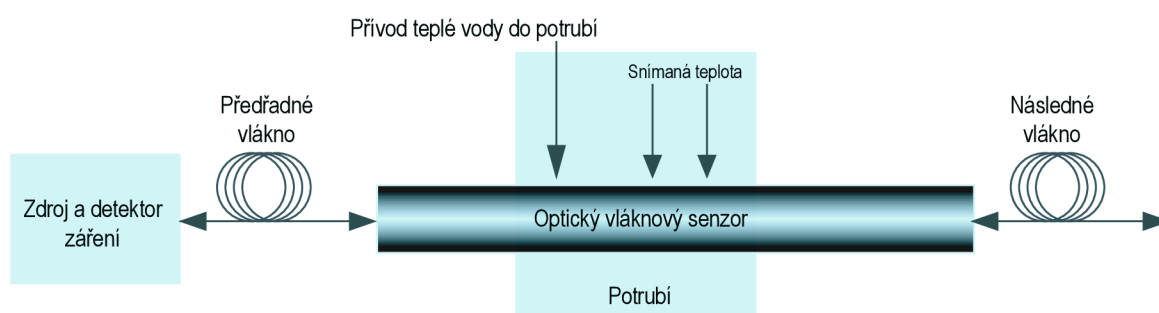
Nastavená délka vedení:	5 000 m
Skutečná délka vedení:	2 117 m
Vlnová délka impulsu	1550 nm
Délka impulsu	5 ns

Tab. 7.1: Tabulka základních hodnot praktického měření OTDR

Vlnová délka impulsu	1650 nm
Délka impulsu	10 ns
Počet provedených měření	7
Délka jednoho měření	2 min.
Opakování měření	každé 4 min.
Délkový krok měření	32 cm
Rozlišení:	0,5 m

Tab. 7.2: Tabulka základních hodnot praktického měření DTS

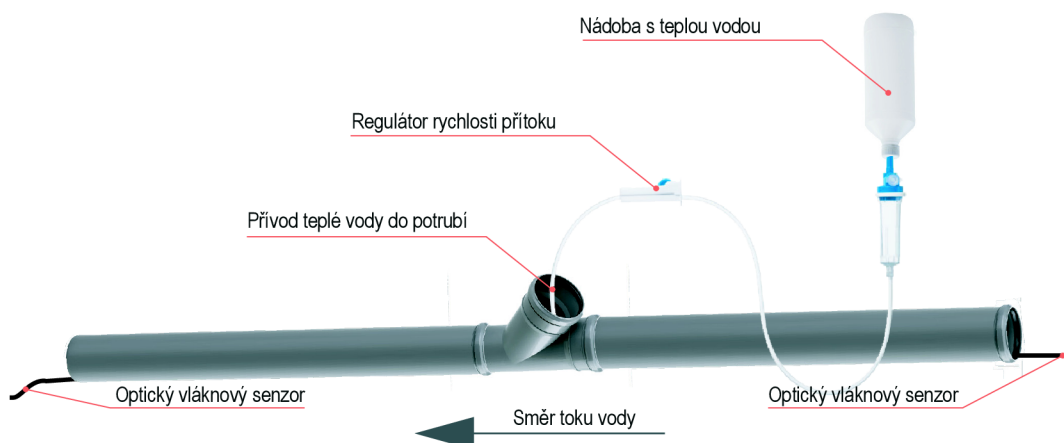
7.3 Blokové schéma praktického zapojení DTS



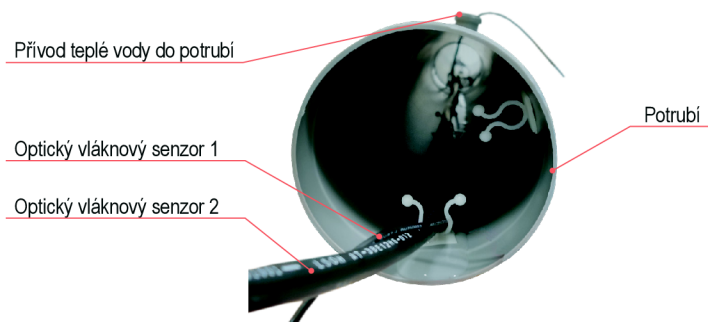
Obr. 7.1: Blokové schéma zapojení praktického měření DTS

7.4 Praktické zapojení DTS systému

Celý systém DTS byl sestaven v laboratoři a byly nastaveny základní parametry měření pro modul OTDR. Celé měření bylo realizováno za pokojové teploty. Přiváděná voda do potrubí měl na začátku asi 40 °C (viz. obr. 7.3, 7.2). Objem vody byl 1,5 litru. Pomalu přívodem teplé vody do potrubí přes odbočku byl simulován průsak vody. Rychlost průsaku vody do potrubí byla asi 0,05 l/min, což je v praxi velmi malá hodnota.



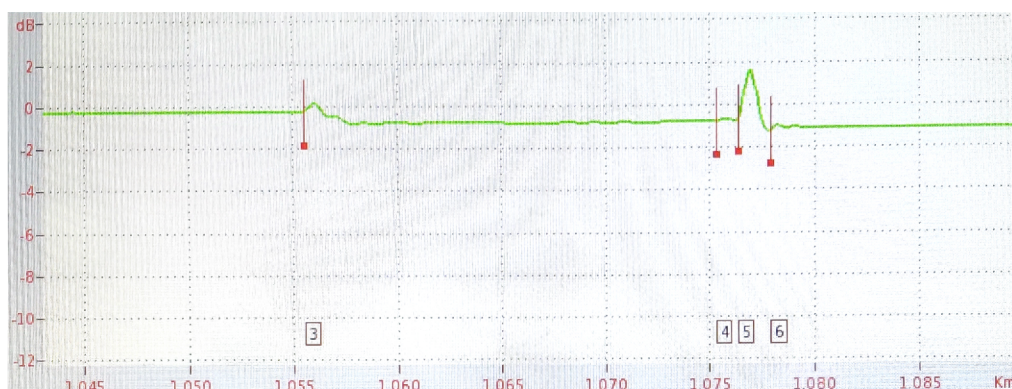
Obr. 7.2: Pohled na potrubí



Obr. 7.3: Pohled na potrubí v řezu

7.5 Postup měření DTS systému

V prvním kroku bylo provedeno proměření trasy pomocí OTDR, jehož modul byl nainstalován v měřícím systému MTS-6000A, a ověřeno zda je správně zapojena (viz. graf 7.4) a nedochází nikde k velkým útlumům, což by nám ovlivňovalo výsledky měření. Na grafu měření jsou patrné přechody na konektorech (čísla 3, 4, 5 a 6). Vodorovná osa značí vzdálenost v km a svislá osa útlum v dB. Tímto měřením lze také jednoduše detekovat poškození vedení a s velkou přesností lokalizovat místo porušení senzoru.

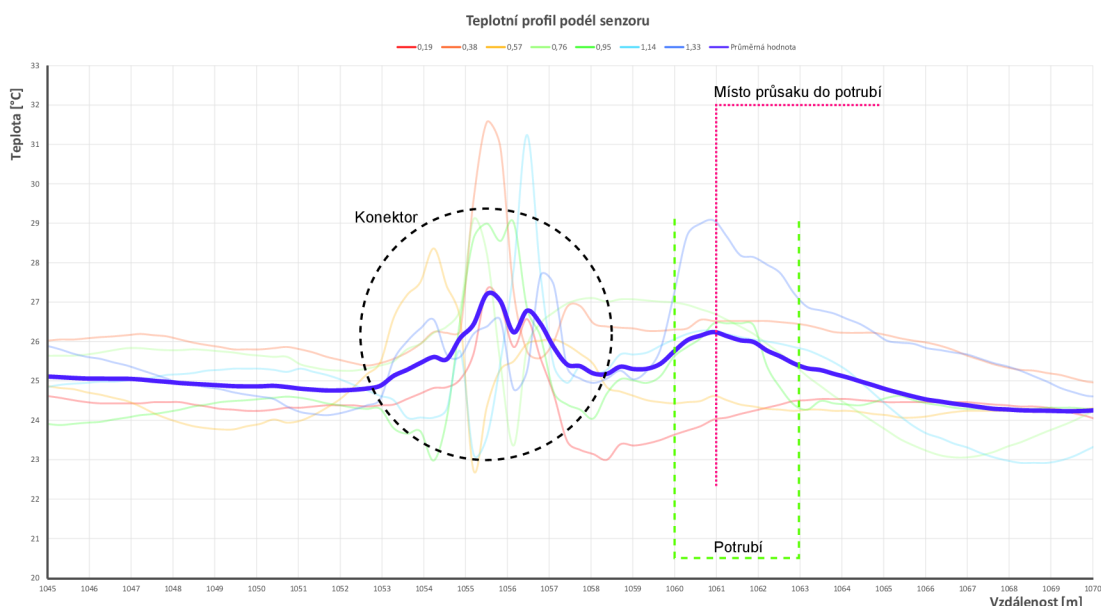


Obr. 7.4: Graf útlumu podél celé délky vedení pomocí OTDR

Dalším krokem bylo nastavení základních parametry měření pro metodu DTS založenou na Ramanové rozptylu na měřícím přístroji (viz tabulka 7.2). Poté byla nastavena rychlost přívodu teplé vody do potrubí. Asi po 0,2 litru vody bylo provedeno první měření. Toto měření trvalo asi 2 minuty a výsledky byly uloženy v měřícím přístroji. Odečet hodnot se opakovalo každé 4 minuty až do spotřebování veškeré vody v nádobce, což bylo celkem 7 měření. Po ukončení byly textové soubory s naměřenými hodnotami převedeny do počítače, kde bylo provedeno vyhodnocení výsledků a grafická interpretace výsledků.

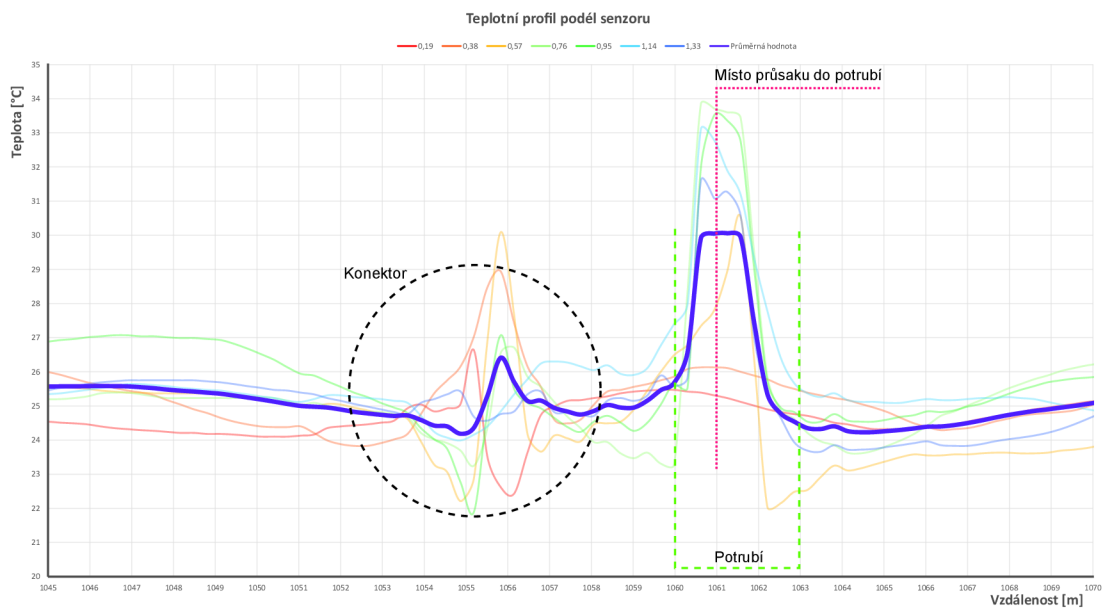
7.6 Vyhodnocení výsledků měření

Na obrázku 7.5 a 7.6 jsou znázorněny výsledky praktického měření. Na barevně odlišených průbězích vidíme, že na měřenou teplotu mají vliv i konektory na vedení (černé zakroužkovaná část na obr. 7.5 a 7.6). Námi měřená část potrubí je znázorněna zelenou čárkovanou čarou a je na ní dobře vidět jak docházelo v této oblasti ke změně teploty vlivem průsaku vody do potrubí. Barevně odlišené křivky jsou průběhy teploty, které byly odečteny měřením (hodnota uvedená v legendě značí množství prosáknuté vody do potrubí). Na těchto průbězích je vidět vliv okolní teploty na přiváděnou vodu, vyrovnávání teploty vody s okolím. I tak je patrná odchylka v místě, kde voda prosakovala a tím bylo možno odhalit místo, kde k tomuto průsaku docházelo.



Obr. 7.5: Graf teplotních průběhů prvního OVS v oblasti 1045–1070 m

Tímto pokusem bylo ověřeno, že i malá změna teploty, která vždy průsak nebo unik kapaliny z potrubí doprovází, je možno detekovat, vyhodnocovat a následně je možno příslušným dohledovým systémem upozornit pověřenou osobu na neobvyklý stav a tak jej dále řešit. Na přesnost měření má také vliv čas, po který měření probíhá (čím delší čas bychom použily tím přesnější výsledek by byl dosažen), ale v našem případě nám nešlo o přesnost měření, ale detekci změny teploty a tím zachycení nežádoucího průsaku okolních kapalin do odpadního potrubí.



Obr. 7.6: Graf teplotních průběhů druhého OVS v oblasti 1045–1070 m

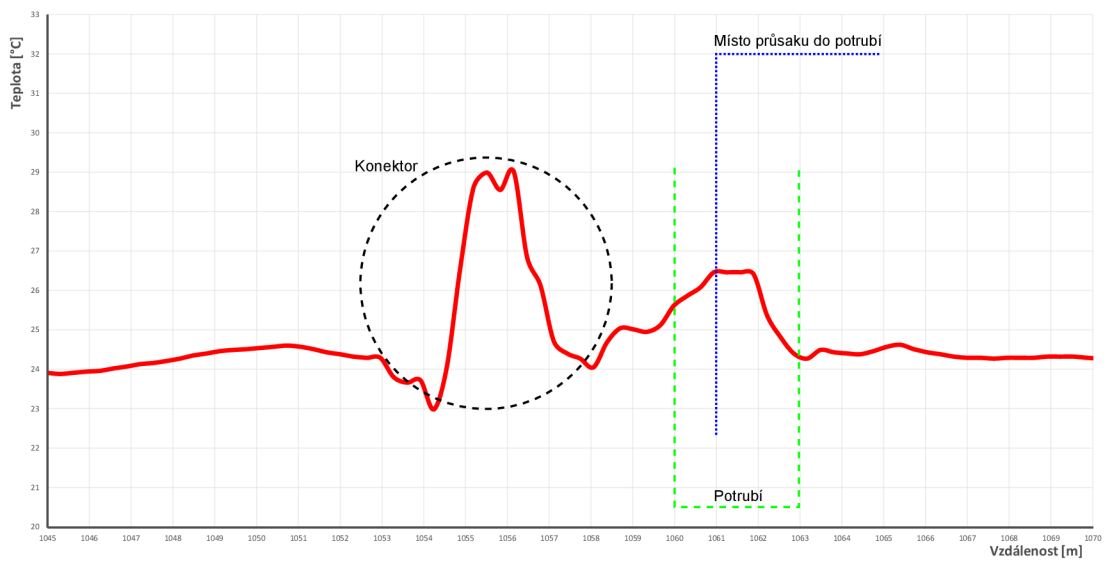
Na následujících grafech průběhů měření (graf 7.7 až 7.10) je patrné jak probíhala změna teploty v měřeném úseku v čase, jak prosakovala voda do potrubí a docházelo k ovlivňování teploty. Na prvním grafu není téměř vůbec patrná změna, protože ke změně teploty ještě v důsledku pomalého vedení tepla prostřením ještě nedošlo. Postupem času se však teplota měnila a OVS nám tuto změnu detekoval. Ovšem vzhledem k tomu že celý pokus byl proveden s minimálním množstvím vody a ve velmi krátkém časovém úseku, jsou výsledky velmi prokazatelné. V praxi by se jednalo o velmi citlivou formu detekce narušení a to na velmi velké vzdálenosti. Při detekci je ale nutno vycházet z hodnot, které jsou naměřeny bez detekce narušení s neustálým srovnáváním zachytávat pouze změny, které se odlišují od běžného stavu. Teplota se v odpadním potrubí může měnit dle toho co právě proudí potrubím, což by mohlo být v některých případech vyhodnoceno jako narušení.



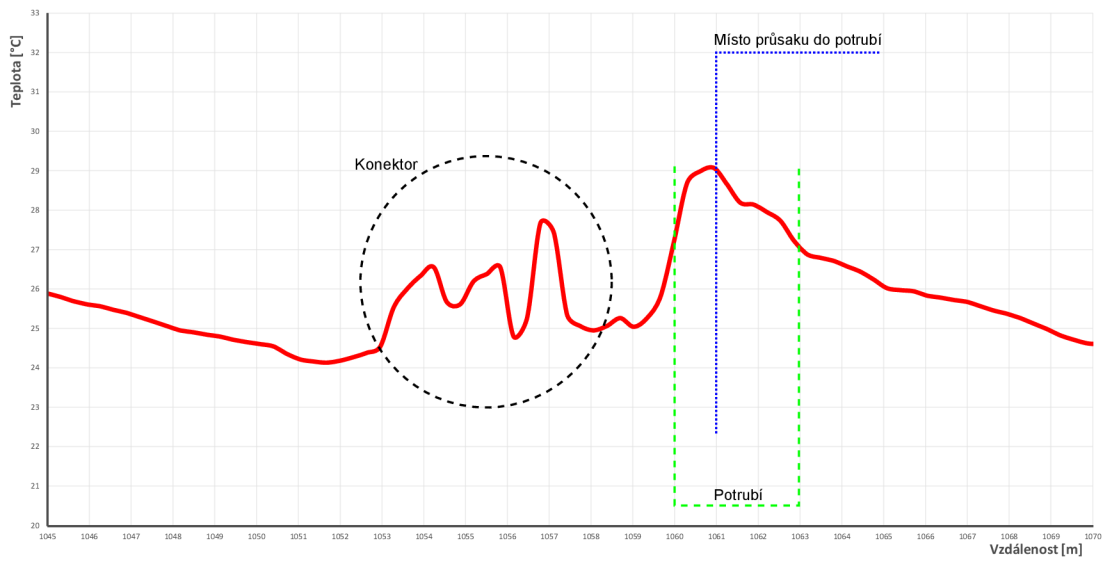
Obr. 7.7: Graf teploty – 4. minuta



Obr. 7.8: Graf teploty – 12. minuta



Obr. 7.9: Graf teploty – 20. minuta

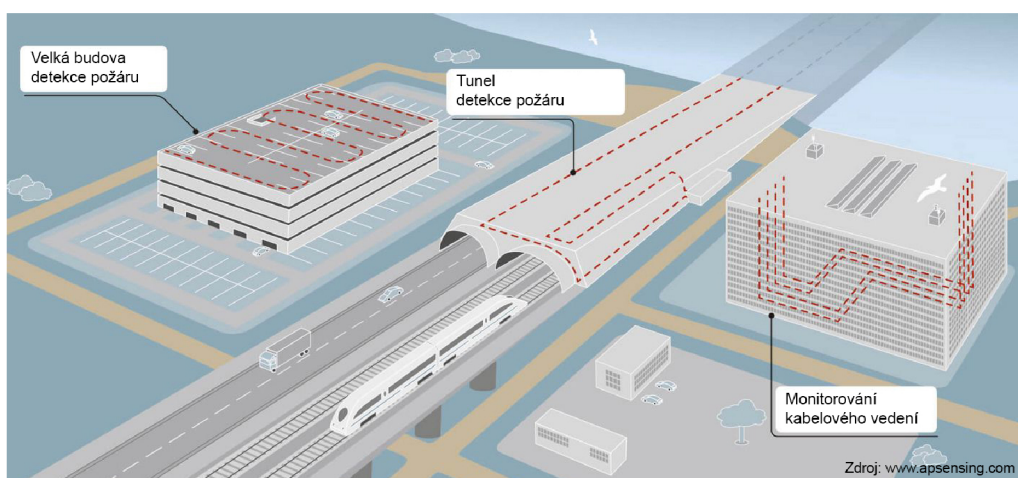


Obr. 7.10: Graf teploty – 28. minuta

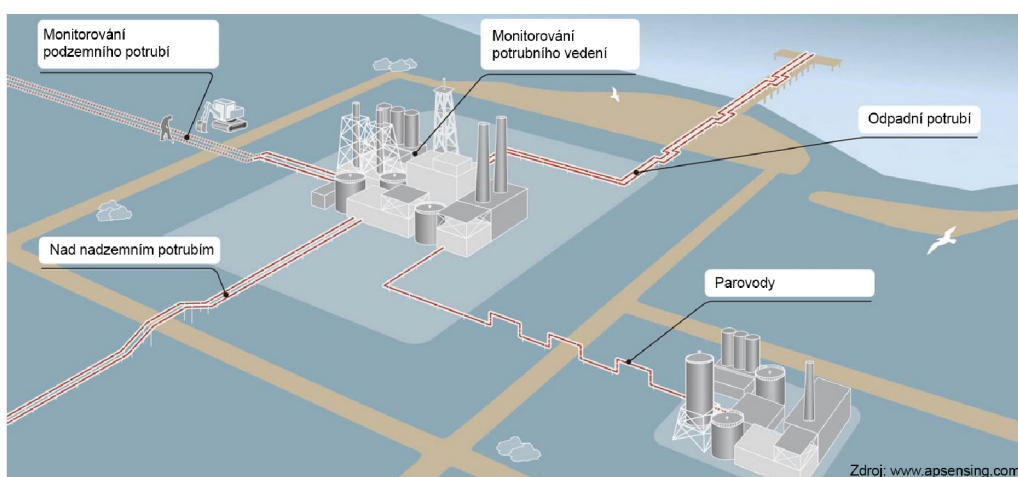
8 Možnosti využití DTS k ochraně KI

8.1 Praktické možnosti ochrany KI

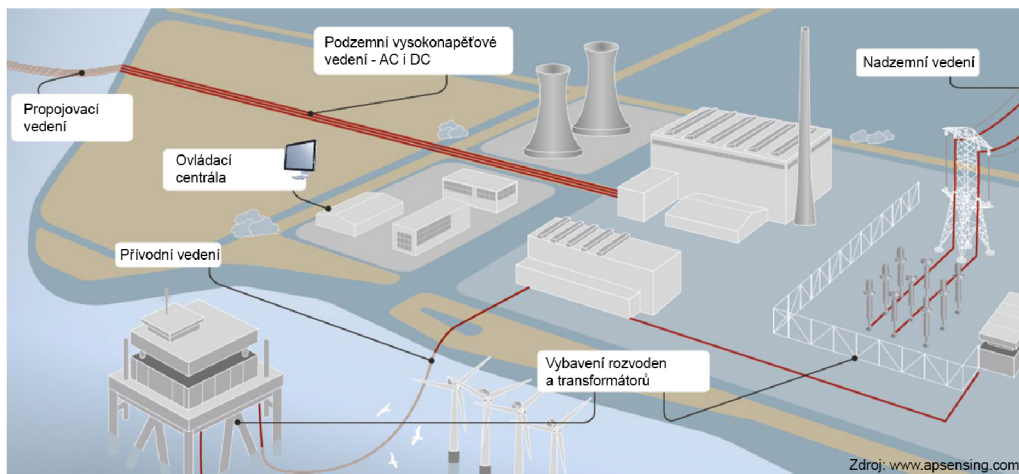
Možností využití DTS v kritických infrastrukturách je mnoho. Z praktického hlediska se vždy bude jednat o kombinaci možností měření veličin, uvedených v teoretické části této práce. Není vždy jen potřeba měřit teplotu, ale také tlak, vibrace... Vybrány byly čtyři oblasti využití s náznakem praktické aplikace - protipožární detekce (obr. 8.1), monitorování potrubního vedení (obr. 8.2), energetické rozvody elektřiny (obr. 8.3) a poslední geotermální a vodní hospodářství (obr. 8.4).



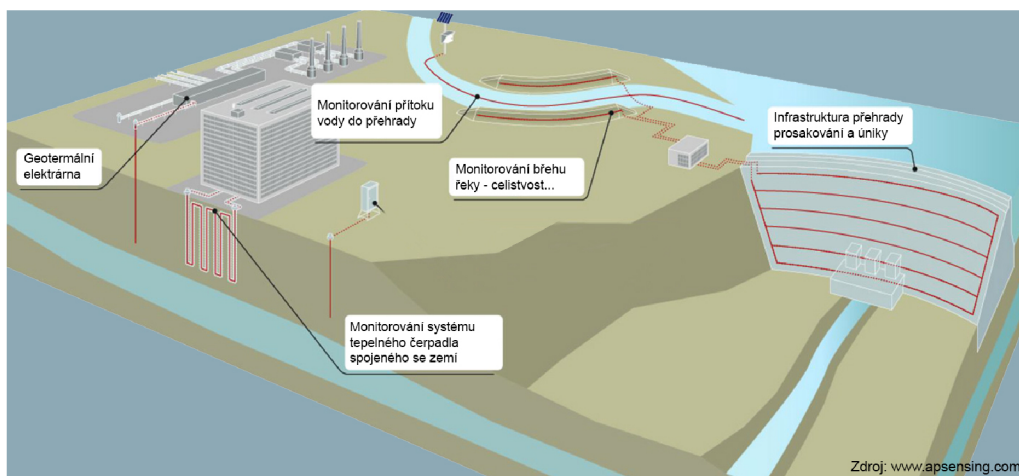
Obr. 8.1: Příklad protipožárního využití DTS



Obr. 8.2: Příklad monitorování potrubního vedení pomocí DTS



Obr. 8.3: Příklad využití DTS v energetice



Obr. 8.4: Příklad využití DTS v geotermální, vodní hospodářství...

Závěr

Cílem bakalářské práce je teoretický rozbor využití optického vlákna jako senzoru teploty a jeho využití v ochraně prvků kritické infrastruktury, který je shrnut v předchozí kapitole o možnostech využití DTS v KI. V rámci této práce bylo zapojení jednoduchého DTS systému a ověření schopnosti optického vlákna snímat teplotu a ověření základních parametrů.

V průběhu praktického měření byla ověřena schopnost optického vláknového snímače snímat teplotní profil podél délky OVS na základě Ramanova zpětného rozptylu v kombinaci s metodou OTDR pro určení vzdálenosti měřeného bodu. Jeho průběhy jsou zveřejněny v této práci. Z nich je patrná citlivost OVS na změnu teploty a také schopnost toto měření provádět na větší vzdálenosti. V průbězích grafů je vidět i vliv okolního prostředí na měřenou teplotu. V laboratorních podmínkách nelze přesně napodobit podmínky v praktickém použití. V aplikaci na prvky kritické infrastruktury, jako jsou vedení elektrické energie, plynu, vody, odpadní vedení, což je jen několik prvků, kde je vhodné metodu DTS nasadit. Je možno pomocí této metody snímat teplotu na velké vzdálenosti (desítky kilometrů) což by bylo pomocí jiných metod náročné a drahé. Tato metoda má velkou výhodu v dlouhé životnosti vláknového snímače (desítky let), také jeho cena je mnohonásobně nižší, než by bylo nahrazení dostatečným počtem klasických bodových snímačů teploty. Také instalace a údržba zabere jen zlomek času oproti běžným snímačům. Nezanedbatelná je i velká odolnost vůči vlivům prostředí, která je závislá na konstrukci OVS (v případě přírodních vlivů) anebo odolnosti na elektromagnetické záření (dáno fyzikálním základem snímače - sklo nebo plast).

V teoretické části byly rozebrány základní možnosti měření, jejich schopnosti, přesnost a také další možnosti měřit i jiné fyzikální veličiny než jen teplota, jako jsou tlak, vibrace, tah, přerušování vedení...

V praktické části bakalářské práce byl simulován průsak teplé kapaliny do odpadního potrubí, kde bylo důležité malé množství prosakované vody s rozdílnou teplotou. I přes to bylo možno poměrně dobře detekována změna teploty v místě průsaku. Vzhledem k faktu že každý průsak nebo přívod kapaliny do potrubí je doprovázen skokovou změnou teploty, je za pomoci DTS možno detekovat neoprávněné vypouštění odpadních vod, nechtěné úniky kapalin a to nejen odpadů, ale i jiných kapalin, které jsou pomocí potrubí dopravovány na různá místa. Zde je také důležité, že optický vláknový senzor je neutrální k médiu, nevytváří ani teplo, magnetické pole, nemá žádné mechanické projevy a není napájen elektrickou energií. V případě poškození nezpůsobí zkrat a lze spolehlivě lokalizovat místo poškození.

Nejslabším prvkem systémů DTS je jednotka pro zdroj záření a jeho detekce. Je to i v současné době velmi finančně i technologicky náročné, ale díky velkému

rozmach v posledních desetiletích se i tato stránka lepší. Komerční nasazení způsobuje, že výrobců zařízení přibývá a tím, jak roste průmyslová výroba tohoto zařízení dochází k poklesu ceny. S novými materiály a technologiemi se také snižuje finanční náročnost na pořizování vstupních surovin a součástí. Přibývá specializovaných OVS, pro nasazení ve velmi konkrétních aplikacích, což nadále rozšiřuje možnosti použití této metody a to i do oblastí, kde až donedávna nebylo možno si představit nasazení OVS (jeskyně, les, stavby, ...).

Literatura

- [1] UKIL A., BRAENDLE H. and KRIPPNER P.: "Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications", *IEEE Sensors Journal (Volume: 12, Issue: 5, May 2012)*, vol. 2012, no. 12, pp. 885-892, 2012. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5955066>
- [2] CHEN L., DOU L., LI XU H. and XIE M. "The research of calibration for spatial resolution in distributed optical fiber temperature sensor system", *2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, vol. 2014, no. 1, pp. 1174-1178, 2014. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6931343>
- [3] KOEPEL M., WERZINGER S., RINGEL T., BECHTOLD P., THIEL T., ENGELBRECHT R., BOSSELMANN T. and SCHMAUSS B. "Combined distributed Raman and Bragg fiber temperature sensing using incoherent optical frequency domain reflectometry", *Journal of Sensors and Sensor Systems (Volume: 7, Feb 2018)*, vol. 2018, no. 7, pp. 91-100, 2018. Dostupné z: <https://www.j-sens-sens-syst.net/7/91/2018/jsss-7-91-2018.html>
- [4] Iyad SHATARAH S. M., OLBRYCHT R. "Distributed temperature sensing in optical fibers based on Raman scattering: theory and applications", *Measurement Automation Monitoring (Volume: 63, Feb 2017)*, vol. 63, no.: 2, pp. 41-44, 2017. Dostupné z: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-4086027f-ebd6-4046-a13d-9aa95074fe51>
- [5] DUŠEK, Martin Ing., MAZANEC, Michal Ing. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů*. [online]. 2012 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf
- [6] DIPOL, *Optické standardy* [online]. Dostupné z: https://www.dipolnet.cz/opticke_standardy_bib327.htm
- [7] Zákon č. 240/2000 Sb., *Zákon o krizovém řízení a o změně některých zákonů (krizový zákon)* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-240>
- [8] Nařízení vlády č. 432/2010 Sb., *Nařízení vlády o kritériích pro určení proku kritické infrastruktury*. [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2010-432>

- [9] Vyhláška č. 523/2005 Sb., *Vyhláška o bezpečnosti informačních a komunikačních systémů a dalších elektronických zařízení nakládajících s utajovanými informacemi a o certifikaci stínících komor*. [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-523>
- [10] Vyhláška č. 528/2005 Sb., *Vyhláška o fyzické bezpečnosti a certifikaci technických prostředků*. [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-528>
- [11] HOLÍK, Tomáš. *Distribuovaný teplotní senzor* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=129602. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, PhD..
- [12] GALLO, Martin. *Optické vláknové senzory* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30282209.pdf>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, PhD..
- [13] DORAZIN, David. *Distribuované optické senzorické systémy* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=125043. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Milan Čučka.
- [14] CHMEL, Marek Bc. *Ochrana produktovodů před intencionálními útoky extremistických a teroristických skupin* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/99997/CHM114_FBI_N3908_3908T005_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=n. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Katedra bezpečnostních služeb, Vedoucí práce: plk.gšt. Mgr. Ing. Libor Kutěj, Ph.D.
- [15] *Pravidla českého pravopisu*. Zpracoval kolektiv autorů. 1. vydání. Olomouc: FIN PUBLISHING, 1998. 575 s. ISBN 80-86002-40-3.
- [16] *VIAVI Solutions / Command the network*. [online]. 2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.viavisolutions.com/en-us>
- [17] *VIAVI Solutions / Command the network*. [online]. 2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.viavisolutions.com/en-us/literature/dts-distributed-temperature-sensing-module-brochure-en.pdf>

- [18] *Bandweaver / Integrated Distributed Fiber Optic Sensing Solutions*. [online]. 2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.bandweaver.com/>
- [19] *AP Sensing / Fiber Optic Distributed Temperature Sensing*. [online]. 2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.apsensing.com/>
- [20] *sensornet*. [online]. 2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.sensornet.co.uk/>
- [21] *Weiss Technik*. [online]. 2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.weiss-technik.com/en/brands/voetschtechnik>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

KI	Kritická infrastruktura
OVS	Optický vláknový senzor
ITU	International Telecommunication Union
DTS	Distribuovaný teplotní senzor
DTSS	Distributed Temperature and Strain Sensing
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
OFDR	Optical Frekvency Domain Reflectometry
λ	Vlnová délka
β_c	Isotermální stlačitelnost
<i>k</i>	Boltzmanova konstanta
<i>p</i>	Fotoelektrický koeficient
<i>d</i>	Průměr jádra optického vlákna
α_{dB}	Měrný útlum vlákna
I_S	Intenzita pásu v Stokesově oblasti
I_{aS}	Intenzita pásu v Anti-Stokesově oblasti
ν_0	Frekvence budícího světelného záření
ν_V	Frekvence Ramanova posunu
<i>e</i>	Eulerovo číslo
<i>T</i>	Termodynamická teplota