



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

SPOJOVÁNÍ OPTICKÝCH VLÁKEN A MOŽNOSTI OCHRANY SPOJŮ

FIBER JOINTS AND THEIR PROTECTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Galovič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Dominik Galovič

ID: 220888

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Spojování optických vláken a možnosti ochrany spojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je teoretický rozbor problematiky spojování a svařování optických vláken a možností mechanické ochrany vytvořených spojů. Analyzovány budou nejen samotné techniky spojování a svařování, ale i metody ochrany spojů, jako jsou tepelné ochrany svárů, mechanické ochrany nebo obnova primární ochrany. Zaměření bude rovněž na parametry vytvořených spojů, jako jsou vložný útlum, odraz, délka vytvořeného spoje nebo mechanická odolnost. V rámci praktické části bude provedeno srovnávací měření pevných spojů a vybraných typů konektorového spojení. Dále bude vytvořen návrh, na základě kterého proběhne optimalizace procesu svařování pro minimalizaci délky spoje a rovněž návrh obnovy primární ochrany. Na základě měření bude připraven návrh laboratorní úlohy umožňující pochopení dané problematiky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] YABLON, Andrew D. Optical fiber fusion splicing. New York: Springer, 2005. ISBN 3540231048.
- [2] MURATA, Hiroshi. Handbook of optical fibers and cables. 2nd ed. New York: M. Dekker, c1996. Optical engineering (Marcel Dekker, Inc.), v. 53. ISBN 0824797191.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

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

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

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

Bakalárska práca sa venuje problematike spojovania optických vlákien. V teoretickej časti sú popísané metódy spojovania optických vlákien, ochrana optických spojov a možné chyby, ktoré kvalitu optického spoja ovplyvňujú. Taktiež sú tu popísané spôsoby merania dôležitých parametrov optického spoja, ako sú útlm či útlm odrazu. Dôležitou súčasťou práce je popis obnovy primárnej ochrany zvarného vlákna. Teória je ďalej uplatnená v praktickej časti, kde sa pomocou spomenutých spôsobov meral útlm daných optických spojov. Súčasťou je aj proovnanie mechanickej pevnosti opticky zvarného spoja a spoja vytvoreného pomocou optických konektorov. Tieto znalosti sú následne uplatnené v návrhu pre minimalizáciu opticky zvarného spoja a boli popísané návrhy pre obnovu primárnej ochrany optického spoja.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

optické vlákna, spojovanie optických vlákien, zváranie optických vlákien, optické konektory, ochrana optického spoja, útlm, útlm odrazu, primárna ochrana, obnova primárnej ochrany, recoater

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the issue of optical fiber joining. The theoretical part describes the methods of optical fiber splicing, protection of optical splices and possible errors that affect the quality of the optical splice. Also described are methods for measuring important optical joint parameters, such as attenuation or reflection attenuation. An important part of the work is a description of the restoration of primary protection of spliced fiber. The theory is further applied in the practical part, where the attenuation of the optical links was measured using the mentioned methods. It also includes a comparison of the mechanical strength of optical splice and a joint formed by optical connectors. This knowledge is then applied in a proposal for minimizing the optical splice and proposals for restoring the primary protection of the optical splice was described.

KEYWORDS

optical fibers, optical fiber joining, optical fiber splicing, optical connectors, optical splice protection, optical loss, optical return loss, primary coating, recoating of primary coating, recoater

GALOVIČ, Dominik. *Metody spojování optických vláken a jejich ochrana*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 87 s. Bakalářská práce. Vedúci práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Dominik Galovič
VUT ID autora: 220888
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2021/2022
Téma záverečnej práce: Metody spojování optických vláken a jejich ochrana

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

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

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu práce pánovi doc. Ing. Petrovi Münsterovi Ph.D. za odborné vedenie, trpezlivosť, konzultácie a vecné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
Ciele práce	13
1 Optické vlákno	14
1.1 Jednovidové vlákno	15
1.2 Mnohovidové vlákno	15
1.2.1 MM so skokovým indexom lomu	16
1.2.2 MM s premenným indexom lomu	16
2 Spojovanie optických vlákien	17
2.1 Metódy spojovania	17
2.1.1 Metóda zvárania	17
2.1.2 Zlepované spoje	20
2.1.3 Mechanické spoje	20
2.1.4 Konektory	22
2.2 Straty ovplyvňujúce kvalitu spoja	26
2.2.1 Straty spôsobené rozdielným priemerom jadra-vlákien	26
2.2.2 Straty spôsobené numerickou apertúrou vlákien	27
2.2.3 Straty spôsobené priečnym posunom osí vlákien	27
2.2.4 Straty spôsobené uhlovou odchýlkou	28
2.2.5 Straty spôsobené odrazom	29
2.2.6 Straty spôsobené pozdĺžnym posunom vlákien	29
2.2.7 Straty spôsobené čistotou čiel konektora	30
2.3 Ochrana optického spoja	30
2.3.1 Obnova primárnej ochrany	31
2.3.2 Pevná ochrana spojov	33
3 Parametre optického spoja	34
3.1 Meranie útlmu	34
3.1.1 Metóda dvoch dĺžok	34
3.1.2 Metóda vložných strát	35
3.1.3 Metóda spätného rozptylu	36
3.2 Meranie útlmu odrazu	37
3.2.1 Transmisná metóda	38
3.2.2 Metóda spätného rozptylu	39

4	Meranie parametrov optických spojov	40
4.1	Pevný spoj - zváranie	40
4.2	Pevný spoj - mechanická spojka	41
4.3	Konektorový spoj	43
4.3.1	Optické vlákna s konektormi FC/APC	44
4.3.2	Optické vlákna s konektormi E2000	47
4.3.3	Optické vlákna s konektormi LC/PC	49
5	Optimalizácia procesu zvárania pre minimalizáciu dĺžky spoja	53
5.1	Magnetické držiaky na vlákno	54
5.2	Testovanie návrhu pre minimalizáciu spoja	56
6	Obnova primárnej ochrany	58
6.1	Návrh vaničky s UV LED	58
6.2	Návrh vaničky s pomocou krokového motora	59
6.3	Testovanie obnovy primárnej ochrany	60
7	Návrh laboratórnej úlohy	63
	Záver	76
	Literatúra	77
	Zoznam symbolov a skratiek	79
A	Zmeny hodnôt výkonu pre optické vlákno s konektorom FC/APC	80
B	Laboratórna úloha	82

Zoznam obrázkov

1.1	Štruktúra optického vlákna	14
1.2	Jednovidové vlákno	15
1.3	MM so skokovým indexom lomu	16
1.4	MM s premenným indexom lomu	16
2.1	Princíp zvarania	18
2.2	Systém L-PAS	19
2.3	Systém LID	19
2.4	3M Fibrlok II 2529	21
2.5	ULTIMODE FAST-MS19	21
2.6	Konektor	22
2.7	Ferule	23
2.8	Konektory	24
2.9	Spojenie dvoch konektorov	25
2.10	Rozdielny priemer jadra	26
2.11	NA odchýlka vlákien	27
2.12	Priečny posun osí vlákien	27
2.13	Uhlová odchýlka vlákien	28
2.14	Fresnelov odraz	29
2.15	Pozdĺžny posun vlákien	29
2.16	Pevná ochrana spoja	33
3.1	Metóda dvoch dĺžok	35
3.2	Vložné straty	35
3.3	OTDR	37
3.4	Transmisná metóda	38
4.1	Priama metóda - praktická časť	40
4.2	Mechanická spojka - spoj č.1	42
4.3	Mechanická spojka - spoj č.2	43
4.4	FC/APC - 1310 nm	44
4.5	FC/APC - 1550 nm	45
4.6	E2000 - 1310 nm	47
4.7	E2000 - 1550 nm	48
4.8	LC/PC - 1310 nm	50
4.9	LC/PC - 1550 nm	51
5.1	Minimalizovaný spoj - návrh č.1	54
5.2	Minimalizovaný spoj - návrh č.2	55
5.3	Minimalizovaný zvar	56
5.4	Minimalizovaný zvar - pigtail FC/APC	57

6.1	Návrh obnovy primárnej ochrany	60
6.2	Schéma zapojenia UV LED	61

Zoznam tabuliek

4.1	Vyhodnotenie strát pri zváraní optických vlákien	41
4.2	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora FC/APC pri vlnovej dĺžke 1310 nm.	44
4.3	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora FC/APC pri vlnovej dĺžke 1550 nm.	45
4.4	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora FC/APC pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1310 nm.	46
4.5	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora FC/APC pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1550 nm.	46
4.6	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora E2000 pri vlnovej dĺžke 1310 nm.	47
4.7	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora E2000 pri vlnovej dĺžke 1550nm.	48
4.8	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora E2000 pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1310nm.	49
4.9	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora E2000 pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1550nm.	49
4.10	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora LC/PC pri vlnovej dĺžke 1310 nm.	50
4.11	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora LC/PC pri vlnovej dĺžke 1550 nm.	50
4.12	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora LC/PC pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1310 nm.	51
4.13	Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora LC/PC pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1550nm.	52
A.1	Zmeny hodnôt výkonu pre optické vlákno s konektorom FC/APC . . .	80

Úvod

Optické vlákna sú dnes čo raz viac a viac využívané na prenos informácií. Z dôvodu požiadavok na prenos pre dlhé vzdialenosti je nutné optické vlákna spojovať. Je to z dôvodu vytvorenia celistvej optickej siete.

Táto bakalárska práca sa venuje metódam spojovania optických vlákien a ich ochrane. Je tu spomenuté spojovanie vlákien pomocou zvárania, ktoré je dnes jedno z najkvalitnejších metód pre spojovanie optických vlákien. Sú popísané požiadavky pre zváranie a postup zvárania elektrickým oblúkom. Následne sa téma venuje spájaniu pomocou mechanických spojok. Pri konektorovom spojovaní sú vymenované jednotlivé typy najpoužívanejších konektorov a taktiež typy ferulí, čo je veľmi dôležitý parameter.

Spojovanie optických vlákien má však aj svoje úskalia. Optický spoj nie je vždy dokonalý. Práca sa teda venuje aj problémom, ktoré ovplyvňujú kvalitu spojovaných vlákien. Najdôležitejším parametrom vlákien je útlm a ten je ovplyvnený viacerými nedokonalosťami, ktoré pri spojovaní vznikajú.

Spoj je samozrejme nutné ochrániť, aby sme zabezpečili mechanické a prenosové vlastnosti spojených vlákien. V práci je rozoberaná aj ochrana optického spoja. Recoating je jedna z najkvalitnejších metód obnovy primárnej ochrany optického vlákna. Práca sa venuje aj typom jednotlivých recoaterov a materiálom, ktoré môžu nahradiť primárnu ochranu.

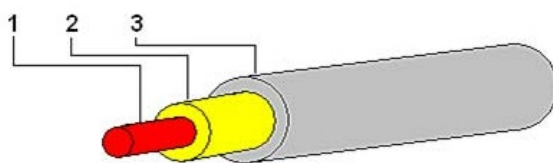
Najdôležitejšími parametrami pre určenie kvality optického spoja sú útlm, útlm odrazu a mechanická pevnosť spoja. Práca sa venuje aj samotným technikám merania útlmu a útlmu odrazu. Bolo prevedené praktické meranie útlmu opticky zvarného vlákna a porovnanie viacerých vlákien spojených pomocou vybraných konektorov a vplyv mechanických zmien na vlákno spojené vybranými konektormi. V praktickej časti bolo popísaných aj pár návrhov pre minimalizáciu opticky zvarného spoja, a vyskúšaný jeden typ držiakov. Práca sa na koniec venuje návrhu obnovy primárnej ochrany.

Ciele práce

Cielom bakalárskej práce je zoznámiť sa s možnosťami spojovania optických vlákien a ich ochrany. V praktickej rovine je za cieľ porovnať parametre jednotlivých optických spojov z hľadiska útlmu a mechanickej odolnosti. Dôležitým aspektom práce je navrhnúť minimalizovaný spoj, z dôvodu využitia v stiesnených podmienkach a zabezpečení krátkeho spoja, bez nutnosti využiť pôvodné zvaracie techniky. Výsledný zvarovaný spoj je za cieľ ochrániť pomocou vytvoreného návrhu na obnovu primárnej ochrany, ktorá zaručí ohybné a funkčné vlastnosti pôvodného vlákna.

1 Optické vlákno

Optické vlákno je valcový dialektický vlnovod, najčastejšie sklenený. Základným materiálom pre jeho výrobu je oxid kremičitý kvôli nízkemu útlmu. K nemu sa ešte pridávajú tzv. legovacie prímеси ako je napríklad bór, germánium a fluor. Skláda sa z jadra, cez ktoré sa prenášajú elektromagnetické vlny a skleneného plášťa, v ktorom nastáva odraz svetla. Pre zaistenie určitej pevnosti a ochrany sa používa primárna ochrana. Pri výrobe a distribúcii optických vlákien sa často používa aj ochrana sekundárna, čím sa zaistí ešte väčšia pružnosť a mechanická ochrana vlákna. Pre potreby sekundárnej ochrany je možné využiť PVC trubku. Hlavným cieľom pri výrobe vlákien je zabezpečenie nízkého útlmu, mechanickej odolnosti vzhľadom na prostredie, v ktorom bude vlákno použité a nízka cena. Štruktúra optického vlákna je znázornená na obr. 1.1 [1],[3].



Štruktúra optického vlákna:

- 1.jadro**
- 2.plášť**
- 3.primárna ochrana**

Obr. 1.1: Štruktúra optického vlákna [4]

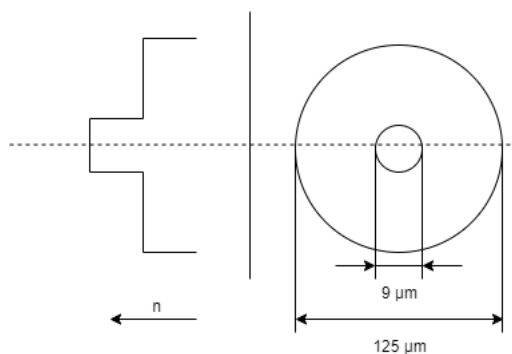
Optické vlákna majú základné parametre, podľa ktorých sa určuje ich kvalita a prenosové vlastnosti. K základným parametrom vlákna radíme [3]:

- Útlm - Je merítkom strát optickej energie vo vlákne.
- Vlnová disperzia - Vidová, chromatická a polarizačná.
- Šírka pásma - Udáva najväčší kmitočet signálu, ktorý môže byť prenášaný spoľahlivo pri vzdialenosti 1km bez nadmerného skreslenia.

Optické vlákna rozdeľujeme podľa niektorých kritérií, ako sú materiál použitý na výrobu - napr. sklo alebo plast, ale aj podľa konštrukcie - jednovidové, mnohovidové či gradientné, ktoré sa od seba odlišujú prenosovými parametrami, priemerom plášťa a jadra ale hlavne počtom vidov. [3].

1.1 Jednovidové vlákno

Tento typ vlákien sa vyznačuje malým útlmom, veľmi malou disperziou a vysokou prenosovou kapacitou, čím sú predurčené na použitie v diaľkových prenosoch, hlavne pre vysokorýchlostné prenosy. Vláknom je šírený len jeden vid a to v smere osy. Priemer jadra sa pohybuje okolo $9\ \mu\text{m}$ a priemer plášťa je $125\ \mu\text{m}$. Zdrojom optického signálu je laserová dioda. Majú lepšie prenosové parametre než vlákna viacvidové. Jednovidové vlákna sa pri vlnovej dĺžke $1550\ \text{nm}$ a šírke pásma $10\ \text{GHz}$ vyznačujú numerickou apertúrou v rozmedzí $0,08 - 0,15$, útlmom $0,2\ \text{dB}$ a disperziou približne $0,3\ \text{ns}$. Príklad tohto typu vlákna je na obr. 1.2 [1],[5].



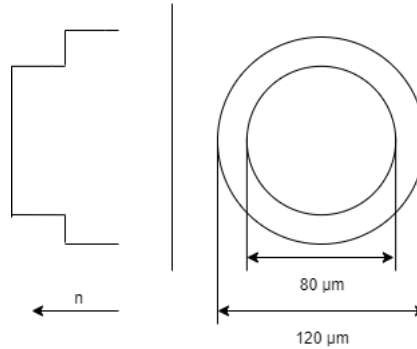
Obr. 1.2: Jednovidové vlákno [1]

1.2 Mnohovidové vlákno

Mnohovidové vlákna, často označované ako MM vlákna, majú oveľa väčší priemer jadra a plášťa ako vlákna jednovidové, čím sú schopné prenášať viac vidov. V multimódovom vlákne sa svetlo pohybuje po jadre a zároveň sa počas svojej cesty odráža od plášťa. Každý lúč svetla má individuálnu dráhu, preto každý dosiahne koniec optického vlákna v rozdielnom čase. Podľa profilu indexu lomu vlákna, poznáme dva typy mnohovidových vlákien, a to so skokovým indexom lomu, alebo s premenným indexom lomu, často označované ako gradientné vlákno. Tieto vlákna trpia vidovou disperziou, ktorá obmedzuje šírku prenášaného pásma, čím nie sú vhodné na prenos po veľmi dlhých trasách. Stupeň multimódového vlákna ovplyvňuje jeho použiteľnú vzdialenosť a možnosti šírky pásma. [1],[5].

1.2.1 MM so skokovým indexom lomu

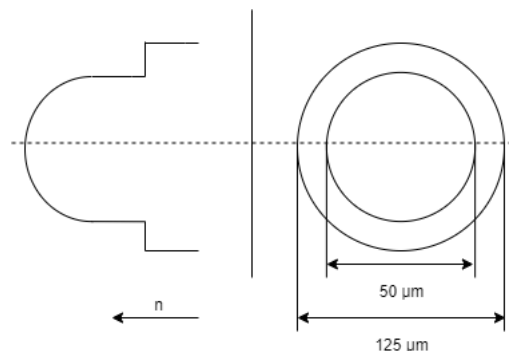
Tieto vlákna sa vyznačujú vyšším útlmom a menšou prenosovou kapacitou. Sú nenáročné na výrobu a využívajú sa predovšetkým pre automatizačné účely. Priemer jadra je približne 50 - 200 μm a priemer plášťa 120 - 300 μm . Štandardná vlnová dĺžka je 0,85 μm , pri ktorej je útlm stanovený na približne 5 až 20 dB a disperzia dosahuje hodnotu 50 ns. Šírka pásma je stanovená na 60 MHz. Znázornenie tohto typu vlákna je na obr. 1.3 [1].



Obr. 1.3: MM so skokovým indexom lomu [1]

1.2.2 MM s premenným indexom lomu

Tento typ mnohovidového vlákna je svojimi parametrami, hlavne menšou disperziou, menším útlmom, ale väčšou náročnosťou na výrobu vhodný pre telekomunikačné účely pre vlnové dĺžky 850 a 1 300 nm. Priemer jadra je 50 μm a priemer plášťa činí 125 μm . V dnešnej dobe sú tieto vlákna nahrádzané jednovidovými vláknami, vzhľadom na lepšie prenosové parametre, kde v prípade týchto vlákien dosahuje útlm 2,5 až 5 dB a disperzia dosahuje hodnotu 1 ns. Šírka pásma je 600 MHz [1].



Obr. 1.4: MM s premenným indexom lomu [1]

2 Spojovanie optických vlákien

Vzhľadom na rôznu dĺžku a rôznorodosť optických vlákien čo sa týka druhov a parametrov, je nutné vlákna vzájomne spájať. Spájanie optických vlákien prebieha hlavne v prípadoch, kedy dostupný optický kábel nie je dostatočne dlhý na inštaláciu v požadovanej dĺžke [1], [3].

2.1 Metódy spojovania

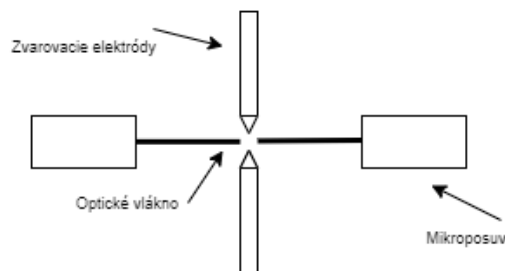
V prípade spájania optických vlákien rozoznávame niekoľko metód. Môže ísť o spoj pevný, kedy ide o trvalé spojenie dvoch vlákien. Sem patrí napríklad metóda zvárania optických vlákien, kde vlákno nemôže byť oddelené od seba inak než opätovným rozlomením. Patrí sem aj spojovanie pomocou mechanických spojok či spoje zlepované. K rozoberateľným spojom patria konektory, ktoré umožňujú opakované spojovanie a rozpojovanie optických vlákien [3].

Pri spojovaní optických vlákien je dôležité, aby boli optické vlákna v jednej spoločnej ose a v tesnej blízkosti. Platí, že čelá optických vlákien musia byť prísne rovinné a kolmé k svojej osi. Je nutné dodržať kvalitnú prípravu konca jednotlivých vlákien, aby sme zaručili kvalitný spoj a tým znížime pravdepodobnosť výslednej nekvality takéhoto spoja. Po spojení vlákien je vhodné premerať kvalitu spoja. Metódy merania parametrov optického spoja sú popísané v kapitole 3 [2],[3],[6].

2.1.1 Metóda zvárania

Ide o metódu pevného spoja. Jedná sa o jednu z najkvalitnejších metód spojovania optických vlákien z dôvodu nízkeho útlmu pri zváraní – približne 0,01 dB. Spoje sú veľmi stabilné a odolávajú extrémne vysokým teplotám. Nevýhodou je však vyššia cena vybavenia potrebného na zváranie. Najčastejšie sa dnes využíva metóda zvárania elektrickým oblúkom. V skratke sa jedná o spôsob spájania vlákien zahrievaním ich koncových čiel a následným spájaním. Hlavným cieľom zvárania je vytvoriť spoj s čo najmenšou stratou, ale zároveň s vysokou mechanickou odolnosťou a trvácnosťou spoja. Zvárací proces by mal byť rýchly a nevyžadovať žiadne predchádzajúce znalosti, či drahé vybavenie. V reálnych podmienkach je však nemožné zabezpečiť ideálne podmienky, preto sa zváranie optických vlákien často nezaobíde bez kompromisov. V laboratórnych podmienkach je kvalita spoja výhradne určená útlmom. V prípade aplikácie do prostredia – napr. v telekomunikáciách alebo pod hladinou mora, je dlhodobá spoľahlivosť dôležitejšia než samotný útlm [2],[3].

Pred samotným zváraním prebieha séria úloh, bez ktorých by zváranie nebolo účinné. Pre čo najkvalitnejší zvar je nutné poznať bod tavenia skla. Podľa typu skla sa musia nastaviť časy natavenia koncov vlákien a zvárania samotného. Následne môžeme pristúpiť k príprave vlákna. Ako prvé je potrebné odstrániť primárnu a sekundárnu ochranu. To je možné docieľiť použitím klieští pre zdrhovanie jednotlivých ochrán. Kvalitné odstránenie primárnej ochrany je dôležité, aby sa na vlákne nevytvorili mikrotrhlky. Druhým krokom je očistenie vlákna, kde vhodným prípravkom – napr. Isopropyalkoholom alebo liehom vlákno dôkladne očistíme za pomoci servítok, na ktoré tekutinu nanesieme a vlákno jemne otrieme. Ak je vlákno správne očistené, nasleduje zalomenie vlákna v zalamovačke vlákien pre dosiahnutie dokonale rovného čela. Pri použití zalamovačky je nutné mať na konci približne 50 mm holého vlákna. Správne dodržanie jednotlivých krokov vedie ku kvalitnému zvaru. Po zalomení sa kontroluje správnosť zalomenia mikroskopom. Konce vlákien musia byť zalomené kolmo bez zvyškov skla a zápraškov. Ak sú vlákna správne zalomené a pripravené na zváranie, musíme ich presne nastaviť proti sebe aby bol výsledný zvar kvalitný. Nastavovanie vlákien je možné docieľiť buď mikroposuvmi, ale v dnešnej dobe, už častejšie, nastavovanie prebieha automaticky. Najčastejšie využívané metódy nastavovania vlákien sú - metóda L-PAS (Lens Profile Alignment System) a metóda LID (Local Injection and Detection). Po nastavení konca vlákien prebehne čistiaci oblúk, ktorý konce vlákien očistí a zároveň predtaví. Samotné zváranie nastane v okamihu, kedy sú od seba vlákna vzdialené približne 20 μm . Po nastavení konca vlákien za približne 0,2 s prebehne natavenie vlákien, ktoré sú k sebe pritlačované s presahom 15 μm . Zvar vzniká pri teplote 1800 – 2000 °C. [1],[2].

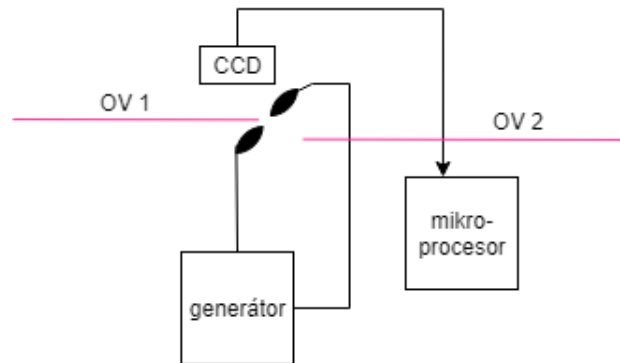


Obr. 2.1: Zjednodušený princíp zvárania

Po dokončení zvárania nastáva kontrola útlmu na spoji a vizuálna kontrola spoja. Ak je všetko v poriadku a samotný zvar nevykazuje žiadne chyby, je nutné takto spojené vlákna ochrániť (viď.kapitola 2.3). V prípade nedostatkov, je nutné vlákno zlomiť a zvar opakovať.

L-PAS

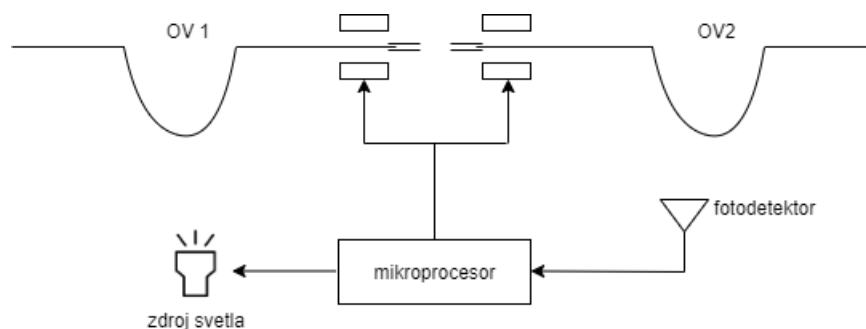
Pozorovanie vlákien prebieha pomocou CCD kamery. Obráz z tejto kamery sa zobrazuje na LCD monitore a z následneho streamu sa vyhodnocuje polohovanie, posúdenie koncových plôch a stanoví sa L-PAS útlm. Princíp systému L-PAS je znázornený na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Princíp systému L-PAS

Systém LID

Je systém nastavovania vlákien založený na vyslanom výkone, ktorý nevyžaduje prístup k voľným koncom spájaných vlákien. Nezalomená časť vlákna blízko jedného z hrotov je ohnutá malým polomerom a osvetlená laserovým žiarením. Svetlo o vlnovej dĺžke 1300 nm sa vysieľa do vysielača na ľavej strane a prijíma sa prijímačom na strane pravej. Tento systém sa taktiež využíva k určeniu uhlu lomu či k meraniu útlmu na spoji po zváraní, keďže pre meranie útlmu nevyžaduje prístup ku koncom vlákien. Princíp tohto systému je znázornený na obr. 2.3 [1],[2].



Obr. 2.3: Princíp systému LID

2.1.2 Zlepované spoje

Podstata týchto spojov spočíva v prilepení vlákna k podkladu a následne dvoch vlákien dohromady pomocou lepidla. Technika lepidlového spoja spočíva v zavedení ultrafialového svetla do vlákna po nastavení geometrie spoja. Lepidlo musí mať podobný index lomu ako vlákno, po vytvrdnutí zaisťuje ochranu spoja pred prostredím, trvalo zaisťuje vlákno v požadovanej polohe a zabraňuje deformáciám daného spoja. Najčastejšie sa používa trubička s vnútorným otvorom, ktorej vnútorný priemer odpovedá vonkajšiemu priemeru spojovaných vlákien a vlákna dotýkajúce sa v nej zalepia. Takéto spoje dosahujú straty okolo 0,1 dB, sú však citlivé na zmenu teploty [1].

2.1.3 Mechanické spoje

Jedná sa o ďalší typ pevného spojovania optických vlákien. Spojky sa často dajú odstrániť, čo by mohlo evokovať, že sa jedná o spoje rozoberateľné, avšak spojky, už častokrát nemôžu byť opätovne použité. Ide o lacnejšiu ale skoro rovnako účinnú metódu spojovania, ako v prípade spoja vytvoreného zvarom. Tento typ spojovania spočíva v držaní vlákien v zárovňavacom prípravku a v znižovaní strát pomocou transparentného gélu či ultrafialového lepidla, ktoré zodpovedajú vlastnostiam skla [7].

Spojovanie pomocou optických spojok môže mať viacero spôsobov zarovňavania vlákien. Dnes sa najčastejšie používa zarovňavanie pomocou V drážiek a kapilárnej trubky. Zarovnanie vlákien formou kapilárnej trubky je najjednoduchším spôsobom a spočíva v zarovnaní dvoch vlákien v malej sklenenej trubke s otvorom, ktorý má priemer väčší ako je priemer vlákna. K zabezpečeniu dokonalého spoja sa spolu s kapilárnou trúbkou používa ultrafialové lepidlo, s ktorým je možné dosiahnuť útlm pod 0,3 dB. Využívanejšie sú však spojky s V drážkou, ktoré sa dnes stávajú takmer plnohodnotnou náhradou za zváranie, ak potrebujeme kvalitný spoj ale finančné prostriedky sú na spojovanie obmedzené [7].

Najpoužívanejšou spojkou s V-drážkou je rýchlospojka 3M Fibrlok II 2529, ktorá používa na zarovnanie vlákien kovové rezače v plastovom obale. Používa sa na spojovanie či už jednovidových ale aj mnohovidových vlákien v 250 μm primárnej ochrane a v 900 μm v tesnej sekundárnej ochrane. Je vhodná pre vlnové dĺžky 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm a 1625 nm. Inštalácia tejto spojky je veľmi jednoduchá a vyžaduje iba plastový montážny nástroj. Priemerný vložný útlm sa pohybuje pod 0,1 dB a útlm odrazu je pri pokojovej teplote pod -60 dB [8].

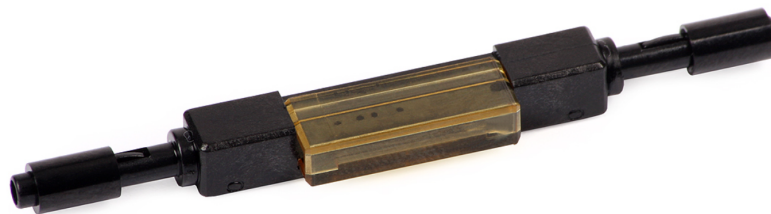
Mechanická spojka je dodávaná v otvorenom stave, preto je nutné ju vložiť do vyhradenej pozície montážneho nástroja. Obe fixačné ramená sa musia natočiť do príslušnej polohy podľa typu spojovaného vlákna. Podľa návodu sa koniec vlákna

pripraví, a ten sa následne opatrne zasunie do konektora. Takto zasunuté vlákno sa fixuje v penovom držiaku. Druhé vlákno sa pripraví rovnakým spôsobom a zasunie sa do konektora tak, dokým sa nevytlačí časť prvého vlákna späť, čím prvé vlákno vytvorí mierny oblúk. Druhé vlákno sa zafixuje v penovom držiaku a zatlačením na vlákno prvé oba oblúky zrovnáme. Preklopením a stlačením páky uzamkneme konektor. Pred vybratím spojky sa najprv oba vlákna uvoľnia z penových fixácií. Spojka je znázornená na obr. 2.4 [8].



Obr. 2.4: Mechanická spojka 3M Fibrlok II 2529 [8]

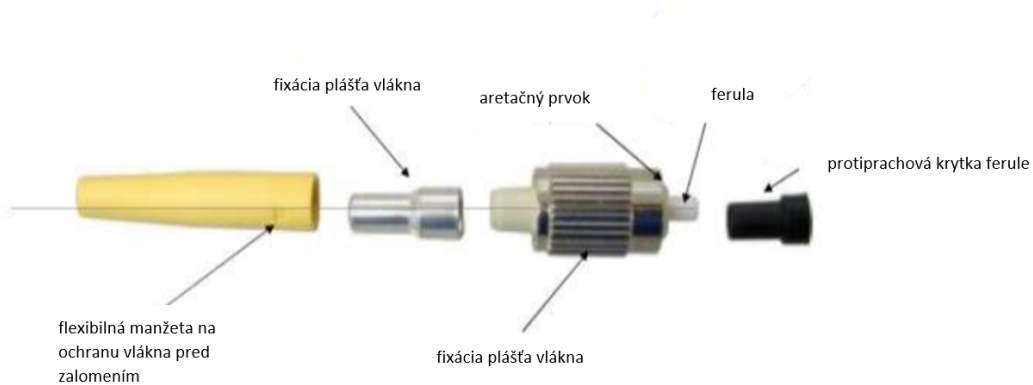
Ďalším typom optickej spojky je spojka ULTIMODE FAST-MS1, ktorá je vhodná pre jednovidové aj mnohovidové vlákna o priemere plášťa 250 μm a 900 μm a s priemerom jadra 125 μm . Vložný útlm sa pohybuje okolo 0,15 dB a čas ktorý je potrebný na spojenie vlákien je približne 60 sekúnd. Tak ako v prípade spojky 3M Fibrlok II 2529 sa jedná o spojku s umiestňovaním koncových plôch vlákna pomocou drážok v tvare V. Spojku je možné rozpojiť a následne spojiť maximálne päťkrát. Spojka je znázornená na obr. 2.5 [9].



Obr. 2.5: Mechanická spojka ULTIMODE FAST-MS1 [9]

2.1.4 Konektory

Spojovanie optických vlákien pomocou konektorov patrí k rozoberateľným typom optického spoja. Hlavným rozdielom medzi jednotlivými konektormi je typ a úprava čela ferule. Ferula je vnútorný valcovitý diel konektoru a jej úlohou je udržiavať optické vlákno presne vo svojej osi a nemennej axiálnej pozícii. Druhov ferulí je na trhu niekoľko. Príčinou nežiaducej energie, ktorá sa šíri v spätnom smere sú Fresnelove odrazy, ktoré vznikajú na rozhraní sklo-vzduch a vzduch-sklo ak je medzi koncami vlákien prítomná vzduchová štrbina. Štrbina vzniká skoro vždy pri plochom ukončení vlákien. Zabrúsením ferulí a tým aj koncov vlákien, môžeme túto energiu postupne znížiť. Spätné žiarenie sa tým pádom obmedzí a potom sa jeho nižšia úroveň rozptýli. Na obr. 2.6 môžeme vidieť základné zloženie optického konektoru [10].



Obr. 2.6: Zloženie konektoru [10]

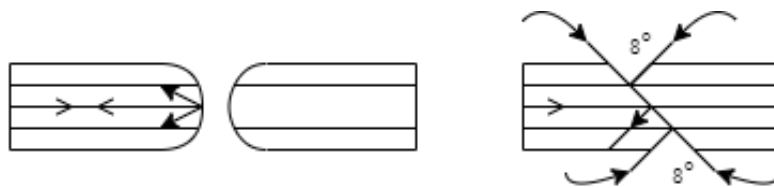
Optické konektory sa vyznačujú dvomi základnými parametrami - vložný útlm a útlm odrazu. Vložný útlm je definovaný ako úbytok žiarivého výkonu, ktorý nastáva na konektorovom spoji. U optického konektorového spoja je možné dosiahnuť malých strát len použitím kvalitného konektoru a optického vlákna, ktorého konce musia byť precízne očistené a obrúsené. Dnes sa typicky vložný útlm, spôsobený rozpojovaním a spojovaním konektoru, pohybuje na úrovni 0,2 dB. Útlm odrazu je spôsobený odrazom ktorý nastáva na rozhraní dvoch dialektrík.[11].

Typy ferulí [1],[11]:

- Aluminiová ferula – veľmi krehký materiál a obtiažné leštenie, veľká tepelná rozťažnosť.
- Zirkóniová ferula – najčastejšie používaný typ ferule, veľmi dobré leštenie, má 4x väčšiu pevnosť ako hliník, opotrebovanie oterom je minimálne.
- Plastová ferula – najlacnejší typ, ľahké leštenie alebo väčší útlm, malé straty vložného útlmu vďaka malému opotrebovaniu oterom, malá životnosť.
- Kompozitná ferula - najpresnejšia ale najdrhšia, malé straty vložného útlmu
- ARCAP ferula – lacná, ľahké leštenie, vysoká životnosť

Aby boli zabezpečené dobré prenosové vlastnosti vláknových spojov, je potrebné koncové čelné plochy ferulí dobre zabrúsiť a vyleštiť. K tomu slúžia leštičky, ktoré sú schopné upraviť viacero konektorov naraz. Hlavné, používané typy zabrúsenia ferulí sú:

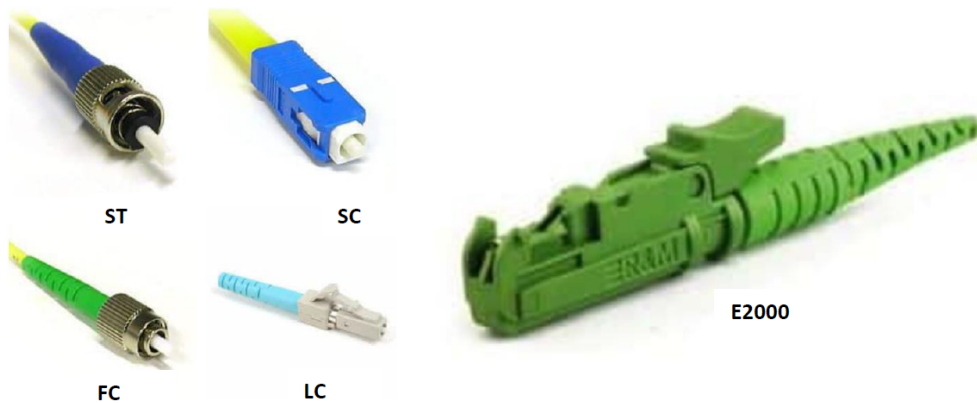
- PC zabrúsenie – sférické zabrúsenie, ktoré poskytuje menšie straty ako ploché zabrúsenie. Vložný útlm dosahuje hodnoty približne 0,1 – 0,3 dB a útlm odrazu -35 dB [1],[12].
- APC zabrúsenie – uhlové sférické zabrúsenie, ktoré sa využíva pri jednovidových vláknach a poskytuje ešte menšie straty než zabrúsenie typu PC. Vložný útlm je približne 0,1 – 0,3 dB a útlm odrazu -65 dB. Čelná plocha ferule APC je zbrúsená v uhle cca 8 stupňov čím sa elimuluje odraz signálu [1],[12].
- SPC a UPC zabrúsenie – pri týchto typoch zabrúsenia zlepšuje kvalitu povrchu konektora predĺžený brúsiaci cyklus, čím je zaručený útlm odrazu menší než -55 dB. Tieto typy zabrúsenia sa používajú vo vysokorýchlostných digitálnych prenosových systémoch [12].



Obr. 2.7: Úprava čela ferule PC (vľavo) a APC (vpravo) [1]

Samotné konektory sa odlišujú od seba farbou, spôsobom zakončenia ferulí a rozličnými možnosťami použitia. V praxi sa používa niekoľko typov konektorov. Tými napoužívanějšími sú:

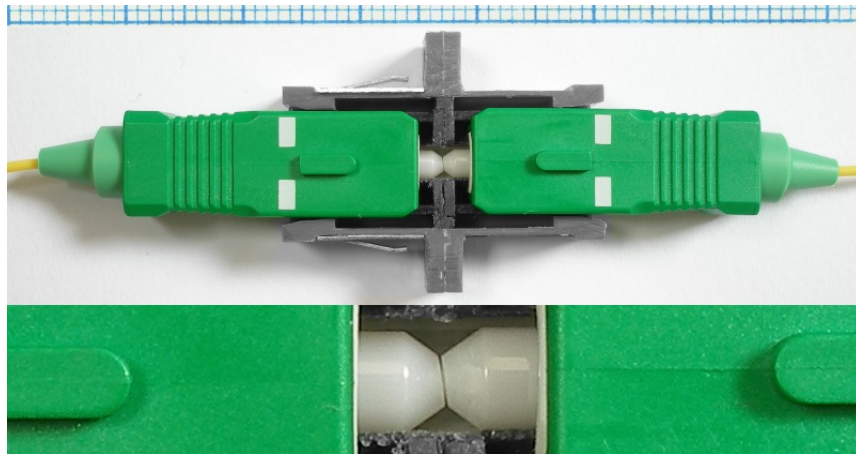
- FC (Ferrule connector) – využíva sa pre spájanie jednovládových a mnohovládových vlákien. Ferula má priemer 2,5 mm a môže byť buď keramická alebo kompozitná. Vložný útlm dosahuje hodnôt v rozmedzí 0,2 až 0,3 dB, útlm spätného odrazu 20 – 30 dB. Využitie nájde predovšetkým v telekomunikáciách [11].
- SC (Subscriber connector) – konektor využívaný hlavne pre spájanie jednovládových vlákien. Priemer ferule je 2,5 mm, prevedenie typu push-pull, vložný útlm v rozmedzí 0,2 – 0,3 dB, útlm spätného odrazu 20 – 30 dB [11].
- ST (Straight type) – určený pre spájanie jednovládových a mnohovládových vlákien. Ferula je odpružená a dosahuje priemer 2,5 mm. Vložný útlm 0,2 dB – 0,3 dB, útlm spätného rozptylu 20 – 30 dB [11].
- LC (Lucent connector) – konektor s veľmi malým priemerom ferule o veľkosti 1,25 mm. Vhodný pre vysoko zaťažené spojenia. Vložný útlm sa pre jednovládové vlákna pohybuje na úrovni 0,15 dB a pre mnohovládové vlákna činí približne 0,1 dB [10].
- E2000 (Euro 2000) – konektor s prevedením push-pull, je európskym štandardom pre telekomunikácie. Používa sa predovšetkým na spájanie jednovládových vlákien. Vložný útlm je približne 0,2 dB a útlm spätného odrazu činí 55 dB [11].



Obr. 2.8: Prehľad najpoužívanějších typov optických konektorov

Jednotlivé farebné označenie konektorov závisí na type zaobrúsenia ferule a typu vlákna. V prípade jednovlákových vlákien s APC zaobrúsením ide o zelený typ konektora, v prípade jednovlákových vlákien, ktoré majú PC zaobrúsenie sa jedná o konektor modrý. V prípade viacvlákových vlákien farba konektora závisí na priemere plášťa a priemere jadra.

Samotné spojovanie optických konektorov prebieha za pomoci optických konektorových spojok. Každý typ konektora má vlastný typ spojky. Je možné spojiť dva rôzne typy konektorov, nie však s rozdielnym zaobrúsením ferule. V prípade takéhoto spojenia dôjde k zvýšeniu útlmu, v horšom prípade k poškodeniu kontaktných plôch konektorov. Konektorové spojky majú výhodu v ich možnom viacnásobnom rozpojení a následnom spojení, čo je vhodné v prípade chyby konektora, zlého zalomenia vlákna, či nutnosti konektor vymeniť za iný typ. V tomto prípade je nutné dbať na čistotu prostredia, samotnej spojky a hlavne ferule konektora, ktorú je nutné vždy poriadne očistiť [2].



Obr. 2.9: Spojenie konektorov APC pomocou spojky

2.2 Straty ovplyvňujúce kvalitu spoja

Každý optický spoj môžeme považovať za vazobný člen, ktorý vnáša do spoja značný útlm, ktorý ovplyvňuje kvalitu daného spoja. Vložný útlm na spoji môžeme obecné definovať ako:

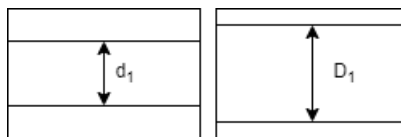
$$A = -10 \log \cdot \frac{P_1}{P_2} \quad [\text{dB}], \quad (2.1)$$

kde P_1 je výkon meraný na výstupe a P_2 je výkon meraný na vstupe [1].

Straty na spojoch vznikajú kvôli veľkému množstvu nedokonalostí, či už v technike spojovania ale aj kvôli stratám vo vlákne samotnom. Spojovaním sa tieto straty môžu ešte prehĺbiť. Straty poznáme vonkajšie a vnútorné. Vnútorné straty sú spôsobené najčastejšie spojovaním dvoch vlákien s odlišnými vlastnosťami, zatiaľ čo vonkajšie straty vznikajú nedokonalou geometriou spoja. Tieto vplyvy vieme eliminovať kvalitnou technikou spojovania. Nižšie popísané straty, však nie sú jediné straty, ktoré ovplyvňujú kvalitu spoja. K vonkajším stratám sa zaraďujú aj straty vzniknuté drsným čelom vlákna a taktiež nesúosťou vlákna a plášťa a taktiež zakrivením vlákna [6].

2.2.1 Straty spôsobené rozdielnym priemerom jadra-vlákien

Ide o spojovanie dvoch vlákien o rozdielnych priemeroch. Vlákna sú však osovo zhodné. Odchýlka vzniká len v prípade, kedy je jadro zdrojového vlákna väčšie ako jadro prijímaného vlákna. Prijímacie vlákno je v takom prípade neschopné zachytiť všetko svetlo. Názornú úkažku je možné vidieť na obr. 2.9 [1].



Obr. 2.10: Rozdielny priemer jadra [1]

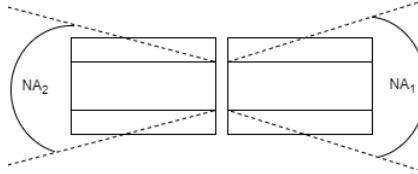
Straty vieme vyjadriť vzťahom:

$$a = -10 \log \cdot \left(\frac{d_1}{D_1} \right) \quad [\text{dB}], \quad (2.2)$$

kde d_1 je priemer zdrojového vlákna a D_1 priemer prijímacieho vlákna.

2.2.2 Straty spôsobené numerickou apertúrou vlákien

Straty numerickou apertúrou sú spôsobené rozdielnou numerickou apertúrou v jadre vysielaného a v jadre prijímaného vlákna. Ak je numerická apertúra rozdielna, sa časť svetla, ktoré je prijímané zo zdrojového vlákna nebude šíriť prijímacím vláknom a následne tieto straty vznikajú. Názornú úkažku je možné vidieť na obr. 2.10 [1].



Obr. 2.11: NA odchýlka vlákien [1]

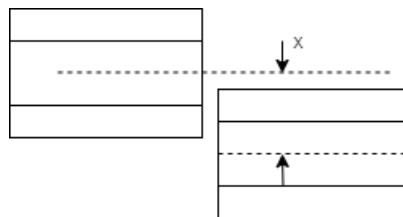
Straty vieme vyjadriť vzťahom:

$$a = -10 \log \cdot \left(\frac{NA_1}{NA_2} \right) \quad [\text{dB}], \quad (2.3)$$

kde NA_1 je numerická apertúra zdrojového vlákna a NA_2 numerická apertúra prijímacieho vlákna.

2.2.3 Straty spôsobené priečnym posunom osí vlákien

Pokiaľ nie sú dva vlákna vzajomne v jednej ose, vznikajú straty spôsobené ich priečnym posunom. Názornú úkažku je možné vidieť na obr. 2.11 [1].



Obr. 2.12: Priečny posun osí vlákien [1]

Pre mnohovidové vlákna sú tieto straty popísane vzťahom:

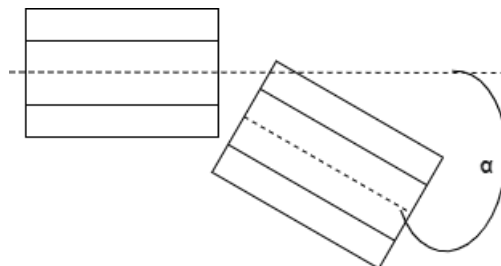
$$a = -10 \log \cdot \left(1 - \frac{8 \cdot x}{3\pi \cdot a} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.4)$$

a pre jednovidové vlákna je vzťah nasledovný:

$$a = -10 \log \cdot e^{\left(\frac{-x}{w_0} \right)^2} \quad [\text{dB}] \quad (2.5)$$

2.2.4 Straty spôsobené uhlovou odchýlkou

Tieto straty vznikajú v prípade, že pri spojovaní dôjde k lomu osovej roviny. Časť svetla sa nedostane do prijímacieho vlákna a vznikajú tak straty. Pokiaľ majú vlákna vyššiu numerickú apertúru, sú tieto straty menšie. Názornú úkažku je možné vidieť na obr. 2.12 [1].



Obr. 2.13: Uhlová odchýlka vlákien [1]

Pre mnohovidové vlákna sú straty vyjadrené vzťahom:

$$a = -10 \log \cdot \left(1 - \frac{8n \cdot \sin(\theta)}{3\pi \cdot NA} \right) \quad [\text{dB}], \quad (2.6)$$

kde n je index lomu prostredia, NA je numerická apertúra a θ je uhol posunutia.

Pre jednovidové vlákna sa používa vzťah:

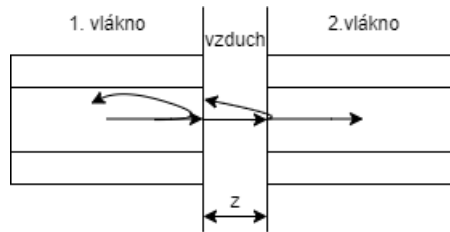
$$a = -10 \log \cdot (e^{T^2}) \quad [\text{dB}] \quad (2.7)$$

kde T je :

$$T = \frac{n \cdot \pi \cdot w_0 \cdot \sin(\theta)}{\lambda} \quad (2.8)$$

2.2.5 Straty spôsobené odrazom

Straty odrazom sú spôsobené Fresnelovými odrazmi. Ich hodnota závisí na kvalite koncových plôch vlákien. Najčastejšie vznikajú pri konektorom spojení, ale aj pri spojoch trvalých na rozhraní vlákno–vzduch–vlákno. Straty Fresnelovými odrazmi na rozhraní sklo–vzduch–sklo vieme znížiť vhodným výplňovým materiálom s podobným indexom lomu ako jadro [1]. Názornú ukážku týchto strát vidíme na obr. 2.13.



Obr. 2.14: Fresnelov odraz [1]

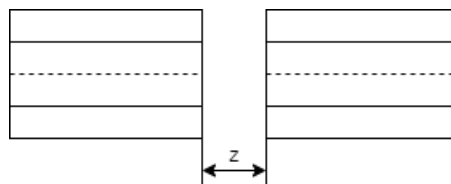
Pre výpočet týchto strát používame vzorec:

$$a = -10 \log \cdot \left[1 - 2 \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \right] \quad [\text{dB}], \quad (2.9)$$

kde n_2 je index lomu prvého vlákna a n_1 je index lomu druhého vlákna.

2.2.6 Straty spôsobené pozdĺžnym posunom vlákien

Stray pozdĺžnym posunom vlákien vznikajú pri veľmi veľkom oddialení koncov spojovaných vlákien. Najviac sa tieto straty vyskytujú pri spajovaní vlákien pomocou konektorov. Ak je na konektore porucha, tieto straty narastajú [1]. Ilustrácia týchto strát je na obr. 2.14.



Obr. 2.15: Pozdĺžny posun vlákien [1]

Pre výpočet strát pozdĺžnym posunom vlákien používame pre mnohovidové vlákna vzorec:

$$a = -10 \log \cdot \left(1 - \frac{z \cdot NA}{2 \cdot a \cdot n}\right) \quad [\text{dB}], \quad (2.10)$$

kde z je vzdialenosť medzi koncami vlákien, NA je numerická apertúra, a je polomer vlákna a n je index lomu prostredia.

Pre jednovidové vlákna platí vzťah:

$$a = -10 \log \cdot \left(1 - \frac{1}{S^2 + 1}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.11)$$

kde S je:

$$S = -\frac{\lambda \cdot z}{2\pi \cdot n \cdot w^2} \quad (2.12)$$

2.2.7 Straty spôsobené čistotou čiel konektora

Okrem strát popísaných vyššie, ktoré sa vyskytujú ako pri konektorovom spojení tak aj pri spájaní vlákien zváraním, sa pri konektorovom spojení objavujú aj straty, ktoré sú spôsobené čistotou ferúl jednotlivých konektorov. Pred samotným spojovaním je nutné čelá konektorov dostatočne očistiť, pretože špinavý konektor môže spôsobiť mnohonásobne väčší útlm, než je prípustné. Pokiaľ sa konektory nevyčistia precízne, je celý proces spájovania zbytočný a výsledná optická trasa môže byť úplne znefunkčnená. Na čistenie konektorov používame bezchĺpkové vreckovky a izopropylalkohol, poprípadne existujú aj sady pre suché čistenie, ktoré sú vhodné ak ide o čas. Kontrolu čistoty je možné robiť mechanickým mikroskopom alebo pomocou video-mikroskopu [1].

2.3 Ochrana optického spoja

Pri konektorovom spojení a spájaní vlákien pomocou optických spojok je ochrana zabezpečená samotným konektorom či spojkou. Na druhú stranu, optický spoj, ktorý vznikol pomocou zvaru, je nutné ochrániť aby sa zabezpečili jeho mechanické a prenosové vlastnosti a nebolo nutné zvár opakovať. Existuje viacero možností ako takto spojené optické vlákno ochrániť. Najpoužívannejšie spôsoby ochrany zvarového optického spoja sú [2]:

- Obnova primárnej ochrany - tzv. recoating
- Pevná ochrana spoja - mechanická ochrana, tepelne zmrštiteľná trubka

2.3.1 Obnova primárnej ochrany

Obnova primárnej ochrany, často nazývaná aj recoating, je technológia balenia zvarného spoja, v ktorej je primárna ochrana, podobná tej originálnej, obnovená na pôvodné vlákno. Najčastejšie je to uretánakrylát vytvrdzovaný UV žiarením, používa sa však aj tepelne tvrdený polyimid. Kvalita takto obnovennej primárnej ochrany je závislá na kvalite daného zväru. Takto obnovené vlákna môžu byť väčšinou zvinuté do malého polomeru, keďže obnovené vlákno je rovnako flexibilné ako vlákno s pôvodnou primárnou ochranou. Obnova primárnej ochrany sa často využíva na vlákna ktoré je nutné následne použiť tam, kde je hotový spoj zvinutý. Recoating sa často využíva na montáž optických tras pod hladinou, kde sú požiadavky na dostatočnú pevnosť veľmi veľké [2].

Samotná obnova spočíva v tom, že sa dokončený zvarný spoj vloží do prelakovacej formy a kvapalný akrylátový materiál sa vstrekuje do formy okolo skleneného povrchu vlákna. Náterový materiál obalí spoj a buď pokrýva alebo sa spája s okrajom pôvodného polymérneho povlaku. Keď je forma naplnená, na vytvrdnutie tekutého polyméru sa používa UV či halogénové žiarenie. Hrúbka náteru sa môže pohybovať od 100 μm do 1 mm v závislosti od veľkosti prelakovacej formy a pôvodného priemeru primárnej ochrany vlákna [2].

Proces obnovy primárnej ochrany spoja je možný viacerými spôsobmi v závislosti od typu recoatera. Recoatery sa od seba líšia jednak spôsobom nanášania ochrany, ale aj typu žiarenia ktoré túto ochranu vytvrdzujú. Typ recoatera s automatickým vstrekovaním obnovovacej kvapaliny a automatickým nastavením formy poskytuje najkvalitnejšie výsledky. Jedná sa však o najdrahší typ recoatera. Užívateľ sa riadi len pokynmi v návode, a montážny prístroj si všetko riadi sám, forma na vlákno je súčasťou recoatera a nie je nutné ju manuálne nastavovať. Tento typ recoatera je vhodný pre obnovu primárnej ochrany vlákien s priemerom povlaku 430 μm . Maximálna dĺžka obnovy je 50 mm. [13].

Ďalším typom je recoater s automatickým vstrekovaním obnovovacej kvapaliny, ale nutnosťou manuálneho nastavenia formy. Forma nie je súčasťou prístroja a je nutné je zakúpiť samostatne a nastaviť manuálne. Prístroj poskytuje automatickú obnovu primárnej ochrany. Forma, ktorú je nutné kúpiť osobitne poskytuje obnovu ochrany pre 280 μm , 430 μm a 600 μm . Rovnako ako v prípade recoatera spomenutého vyššie je maximálna dĺžka obnovy 50 mm [13].

Najlacnejším typom recoatera je recoater s manuálnym vstrekovaním kvapaliny a manuálnym nastavením formy. Poskytujú dĺžku ochrany 50 a 100 mm v závislosti od dokúpenej formy. V tomto prípade sa forma kupuje samostatne a od používateľa sa vyžaduje, aby materiál dávkoval manuálne do dutiny formy.

Tieto recoatery sú vhodné v prípade, že je nutné za pochodu meniť parametre obnovy ochrany primárnej ochrany. Forma, ktorú je nutné dokúpiť osobitne poskytuje obnovu ochrany pre 280 μm , 430 μm a 600 μm [13].

Materiály vhodné pre obnovu primárnej ochrany

Materiál, ktorý môže byť použitý na obnovu primárnej ochrany závisí od typu recoatera. Materiál môže mať vysoký alebo nízky index. Recoatery s manuálnym vstrekaním kvapaliny sú kompatibilné s oboma typmi prelakovacieho materiálu, zatiaľ čo recoatery s manuálnym nastavovaním ale automatickým vstrekaním sú kompatibilné len s prelakovacím materiálom s vysokým indexom [13]. Jeden z popredných výrobcov recoaterov a recoatovacích materiálov je spoločnosť THORLABS.

V prípade recoaterov sa najčastejšie aj v sfére Telekomunikácií používa recoatovací materiál Akrylát, ktorý sa spolu s recoaterom a UV lampou stal jedným z popredných materiálov na obnovu primárnej ochrany. Vysokoteplotný akrylát sa používa aj kvôli jeho odolnosti voči pare a nečistotám. Jednou z alternatív k bežným akrylátovým náterom je jedna vrstva 10 μm polyimidového povlaku. Polyimid je vhodný pre miesta s extrémnymi podmienkami, vďaka jeho stabilite pri vysokej teplote. Niektoré vlákna obalené polyimidom dokážu dlhodobo odolávať teplotám až 300 ° C a 400 ° C na krátky čas. Polyimidové povlaky sú však oveľa viac ťažko odstrániteľné a vo všeobecnosti sa vyskytujú len na určitých špeciálnych vláknach. V praxi sa taktiež používajú aj ďalšie typy materiálov pre obnovu primárnej ochrany [14]:

- Fluórakrylát — netoxický a odolný, tento náter je ideálny pre medicínske aplikácie.
- Silikón — odolný voči vodnej pare a množstvu chemikálií, silikón je mäkký a ak je potrebné ho použiť na ochranu je nutné ho tmiť, zvyčajne pomocou termoplastov ako ETFE, PFA alebo FEP.
- Polyamid — odolný voči teplu a chladu, silný, polyamid sa často vyberá pre letecké projekty.
- Karbón — ochrana pomocou tohto materiálu výrazne predlžuje životnosť vlákna a možno ho použiť s inými povlakovými materiálmi.

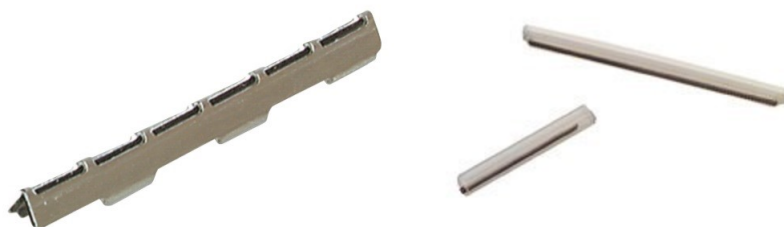
Väčšina týchto materiálov sa môže kombinovať, čím je možné dosiahnuť kvalitu pôvodnej primárnej ochrany.

2.3.2 Pevná ochrana spojov

Optické spoje, ktoré vznikli formou zvaru, sú najčastejšie chránené pevnou ochranou. Ide o najlacnejšiu variantu ochrany zvarového spoja. Pevnú ochranu spojov rozdeľujeme do dvoch kategórií - tepelne zmrštitelná trubička a krimpovací prípravok. Podobu jednotlivých pevných ochrán je možné vidieť na obr. 2.15. Pevná ochrana by mala zabezpečiť mechanickú odolnosť daného spoja, avšak z dôvodu svojho dizajnu sú spoje chránené pevnou ochranou oproti spojom, kde bola obnovená primárna ochrana, neohybné a ťažšie sa pokladajú do fiber housingu [2].

V prípade teplotne zmrštitelnej trubky, musí byť táto nasunutá na vlákno ešte pred samotným zvarovaním, po ktorom je trubka umiestnená na daný spoj a v peci na to určenej, je trubka teplotne zmrštená na optické vlákno. Trubka je zväčša plastová a obsahuje kovovú časť, ktorá zabezpečuje pevnosť. Dĺžka plastovej trubky závisí od veľkosti zvaru, najčastejšie však 45 mm a 60 mm. Dnes už toto zmrštenie častokrát zabezpečuje samotná zvaračka, ktorá v hornej časti obsahuje pecu na tento účel [2],[15].

Alternatívou k teplotne zmrštitelným trúbkam sú krimpovacie prípravky v tvare mušle, ktoré nie je potrebné pred zvarovaním umiestniť na vlákno. Tieto krimpovacie prípravky sú zvyčajne vyrobené z pevného plastu a krimpujú sa na tavný spoj a susediace oblasti optického vlákna, aby zabránili ohýbaniu alebo krúteniu [2],[15].



Obr. 2.16: Pevná ochrana spoja - krimpovací prípravok vľavo a plastová trubka vpravo [15]

3 Parametre optického spoja

Spojovanie optických vlákien, či už zvarom, alebo spájaním konektorov a použitím mechanických spojok, so sebou, okrem pozitív, prináša aj viacero nevýhod. Samotné vlákno sa vyznačuje určitými stratami a následný zvar či spojenie dvoch vlákien konektorom alebo spojku tieto straty navyšujú. Z tohto dôvodu je nutné spojené optické vlákno premerať a overiť tak kvalitu spoja. Najdôležitejšími parametrami, ktorými sa zisťuje kvalita optického spoja patrí útlm a útlm odrazu.

3.1 Meranie útlmu

Útlm je základným a najdôležitejším prenosovým parametrom a je celkovým merítkom strát optického výkonu pri šírení optického signálu vláknom. Podľa neho vieme určiť nie len kvalitu samotného vlákna, ale taktiež celkovú kvalitu optickej trasy spojovaní. Útlm vieme vyjadriť vzťahom [1]:

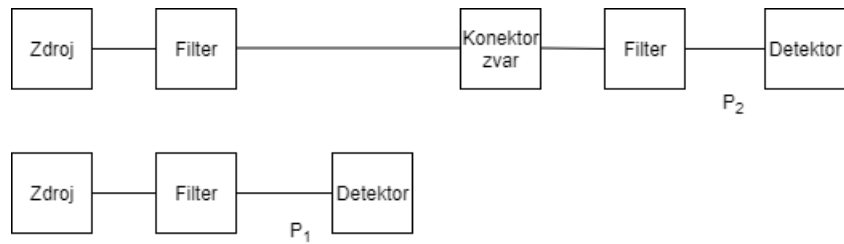
$$A = 10 \log * \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad [\text{dB}], \quad (3.1)$$

kde P_1 a P_2 sú optické výkony (W) pri vlnovej dĺžke.

Meranie útlmu sa najčastejšie robí pre vlnové dĺžky 850nm, 1300nm, 1310nm a niekedy aj pre 1550nm. Podľa normy ČSN EN 61300-3-4 sú najvhodnejšími metódami pre meranie útlmu pri optických spojoch, ktoré vznikli zvarom či spojovaním pomocou konektorov, metóda dvoch dĺžok, metóda vložných strát (vložného útlmu) a metóda spätného rozptylu (OTDR) [16]. Prvé dve spomenuté metódy sú metódy transmisné, pri ktorých sa výkon meria priamo a následný útlm sa vypočíta zo vzorca 3.1. Výhodou priamych metód v porovnaní s metódou OTDR je dosiahnutie rýchlejšej a presnejšej hodnoty útlmu dlhších trás. Priama metóda je taktiež vhodná pre zistenie ohybu vlákna na trase. Nevýhodou je však to, že priamou metódou je nemožné lokalizovať prípadnú poruchu spôsobenú veľkým útlmom [1].

3.1.1 Metóda dvoch dĺžok

Pre svoju citlivosť je táto metóda odporúčaná ako metóda referenčná aj keď sa jedná o metódu destrukčnú. Jedná sa o dvojestupňovú metódu a radí sa medzi najpresnejšie metódy pre meranie útlmu optických vlákien a spojov. Metóda je skôr vhodná pre meranie útlmu v laboratórnych podmienkach a vzhľadom k jej nepraktickosti v teréne sa používa výhradne metóda vložných strát. Zapojenie pre meranie útlmu touto metódou je na obr. 3.1 [1].

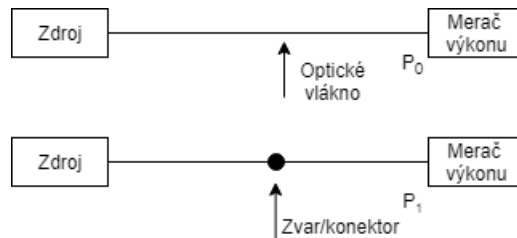


Obr. 3.1: Meranie útlmu metódou dvoch dĺžok [16]

Princíp spočíva v tom, že po naviazaní optického výkonu zo stabilizovaného optického zdroja so zapojeným väzobným členom/filtrom do mereného vlákna o dĺžke l sa na konci vlákna v bode 2 zmerá výkon. Následne sa vlákno skrúti a zmerá sa výkon v bode 1. Výsledný útlm sa vypočíta podľa vzorca 5.1 [1],[16].

3.1.2 Metóda vložných strát

Táto metóda je vhodná pre meranie útlmu hlavne pri spojoch opatrených konektormi. Tak ako v prípade metódy dvoch dĺžok, aj táto metóda vyžaduje dvojstupňové meranie. Jedná sa o metódu nedeštruktívnu, ale menej presnú než metóda dvoch dĺžok. Zapojenie pre meranie útlmu toutou metódou je na obr. 3.2 [1],[16].



Obr. 3.2: Meranie útlmu metódou vložných strát [16]

Pred samotným meraním je nutné meraciu súpravu nakalibrovať pomocou referenčného vlákna priamym prepojením zdroja žiarenia s detektorom, čím dostaneme výkon P_0 . Následne namiesto referenčného vlákna do meracej sústavy zapojíme požadované optické vlákno, opatrené konektormi či zvarom. Na tomto vlákne sa namerá výkon P_1 . Výsledný útlm vypočítame pomocou vzorca [1],[6].

$$A = P_0 - P_1 \quad [\text{dB}] \quad (3.2)$$

Dnes sa už využívajú prístroje, ktoré útlm na optickom spoji pri použití tejto metódy vypočítajú automaticky. V tomto prípade sa útlm zobrazí na displeji meracej aparatúry a odpadá nutnosť manuálneho počítania útlmu.

3.1.3 Metóda spätného rozptylu

Metóda spätného rozptylu, skrátene nazývaná aj metóda OTDR, je metóda založená na použití optického reflektometru. Jedná sa o metódu jednostrannú, v praxi sa však častokrát stretne s požiadavkou merať parametre optickej trasy touto metódou výhradne obojsmerne. Je vhodnou a často používanou metódou pre meranie útlmu na optickom spoji či už jednovidových ale aj mnohovidových vlákien. Vzhľadom na to, že späťne rozptýlený signál jednovidových vlákien je silnejší, je pre tieto vlákna táto metóda účinnejšia. Meranie touto metódou sa používa častejšie pri vytváraní optickej trasy, než pre samotné meranie útlmu po zvarovaní či spajovaní pomocou konektorov, keďže poskytuje škálu informácií, než len samotný útlm. Oproti dvom predchádzajúcim metódam, u metódy OTDR sa vyhodnocuje časová závislosť spätného rozptýleného výkonu P pri šírení impulzu vo vlákne [1],[2].

Nežiadúcim javom pri tejto metóde je Fresnelov odraz, ktorý vzniká na rozhraní dvoch prostredí s rozdielnymi indexami lomu. Z tohto dôvodu je vhodné pred samotné meranie vlákno umiestniť vlákno predradné, ktoré má za úlohu eliminovať mŕtvu zónu detektoru, ktorá vzniká na začiatku vlákna Fresnelovým odrazom [1],[16].

Ďalším úskalím tejto metódy je správne nastavenie dĺžky impulzu a dĺžkový rozsah prístroja. Správna voľba šírky impulzu nám zaručí požadovanú citlivosť fotodetektora a dĺžkovú rozlišovaciu schopnosť. Pri správnom nastavení dĺžkového impulzu predídeme výskytu „duchov“, ktoré sú spôsobené Fresnelovými odrazmi od konca vlákna [16].

Predpokladajme, že do meraného vlákna naviažeme obdĺžnikový optický impulz s výkonom P_0 a šírkou t . Časť výkonu impulzu sa v každom bode vlákna odrazí späť vplyvom Rayleighovho rozptylu. Späťne detekovaný a odrazený výkon $P_b(l)$ je možné vyjadriť vzťahom [16]:

$$P_b(l) = \frac{1}{2} \cdot P_0 \cdot \delta t \cdot S \cdot \alpha_R \cdot v_g \cdot e^{-2\alpha l}, \quad (3.3)$$

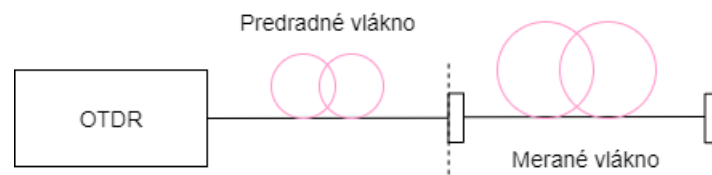
kde P_0 je vstupný výkon, v_g je skupinová rýchlosť šírenia signálu, δt je šírka optického impulzu, α_R je činiteľ strát Rayleighovým rozptýlením, α je stredná hodnota koeficientu útlmu vlákna na dĺžke l a S je koeficient spätného rozptylu, ktorý vyjadruje, aká pomerná časť optického výkonu sa po rozptýlení šíri vláknom v spätnom smere. Pre gradientné vlákna je to zvyčajne hodnota 0,005 [16].

Dĺžková súradnica l je s časom spojená prostredníctvom skupinovej rýchlosti šírenia v_g vzťahom:

$$t = \frac{2 \cdot l}{v_g} \quad [\text{s}] \quad (3.4)$$

OTDR prístroj sa skladá z viacerých komponentov. Medzi základné patrí zdroj svetla, pulzný generátor, vazobný člen, A/D prevodník a riadiaca jednotka. Zdrojom svetla môže byť polovodičový laserový zdroj, ktorý vysiela pulzy svetla, ktoré smerujú skrz vazobný člen do meraného optického vlákna. LED dióda ako zdroj žiarenia použitá byť nemôže, z dôvodu nedostatočnej pološírky vyžiareného impulzu [6].

Pre samotné vyhodnotenie útlmu spoja sa používa štvorbodová alebo päťbodová metóda. Pre čo najpresnejší výsledok sa odporúča používať päťbodovú metódu, ktorá spočíva v nastavení kurzorov na začiatok a koniec vlákna pred a za meraný spoj, alebo súčastku a celkový útlm sa odčíta ako rozdiel medzi útlmom konca predradného vlákna a začiatkom vlákna nasledujúceho [16]. Všeobecná schéma zapojenia merania útlmu pomocou OTDR je na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Meranie útlmu metódou OTDR [1]

3.2 Meranie útlmu odrazu

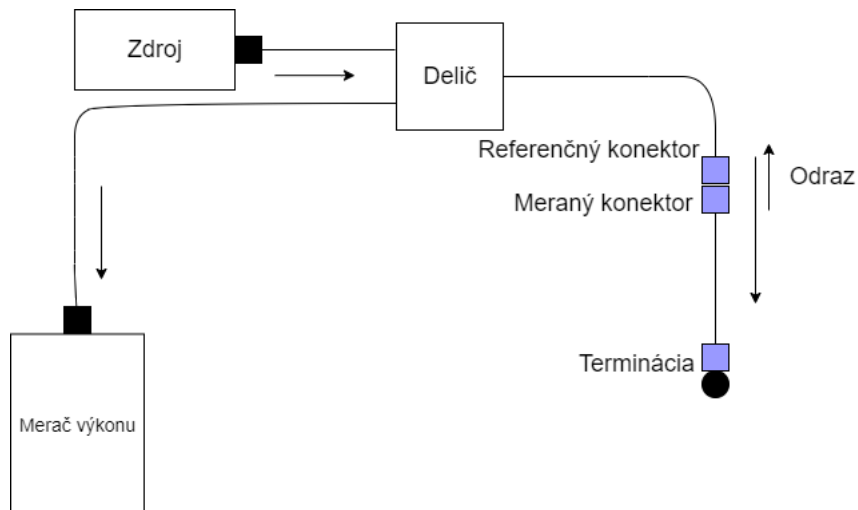
Spolu s útlmom, je útlm odrazu jeden z najdôležitejších parametrov pre určenie kvality spoja a optickej trasy. Útlm odrazu predstavuje celkové nahromadené svetlo odrazené späť do zdroja pozdĺž telekomunikačného spojenia. Odraz žiarenia nastáva na rozhraní dvoch materiálov s rôznym indexom lomu. Hovoríme o nekvalitnom konektorovom spojení, či nesprávne zvarovaných spojkách. Pri konektorovom spojení je možné dosiahnuť maximálneho útlmu odrazu jedine čisto zalomenými plochami. Pre meranie útlmu odrazu sa používajú dve metódy, a to, metóda transmisná a metóda spätného rozptylu [16]. Útlm odrazu vieme obecné vyjadriť vzťahom:

$$RL = 10 \log \cdot \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \quad [\text{dB}], \quad (3.5)$$

kde P_r je späťne odrazený výkon a P_i je vstupný výkon.

3.2.1 Transmisná metóda

Táto metóda využíva na vyhodnocovanie útlmu odrazu zdroj svetla a merač výkonu. Typicky sa využíva referenčný konektor, ktorý je spojený so súčiastkou, ktorú chceme testovať. Ako prvé je nutné zmerať výkon na výstupe z referenčného vlákna. Následne sa merač výkonu prepojí, a zmerá sa výkon konca referenčného vlákna po terminácii. Terminácia je spôsob minimalizovania odrazu. Odraz sa najčastejšie minimalizuje nanosením gélu na koniec referenčného vlákna. Pre jendovidové vlákna je možné použiť aj druhú metódu terminácie a tým je použitie veľmi tesného tzv. “mandel wrapu” – približne 10 zvinutí na 6 mm mandreli. Signál by mal byť týmto zoslabený, čím sa minimalizujú odrazy od prídavných komponentov. Následne sa pripojí meraná súčiastka s vláknom k referenčnému vláknu, prevedie sa terminácia a zmerá sa výkon. Kompletná schéma zapojenia pri ktorej je použitá terminácia gélom je znázornená na obr. 3.4 [17].



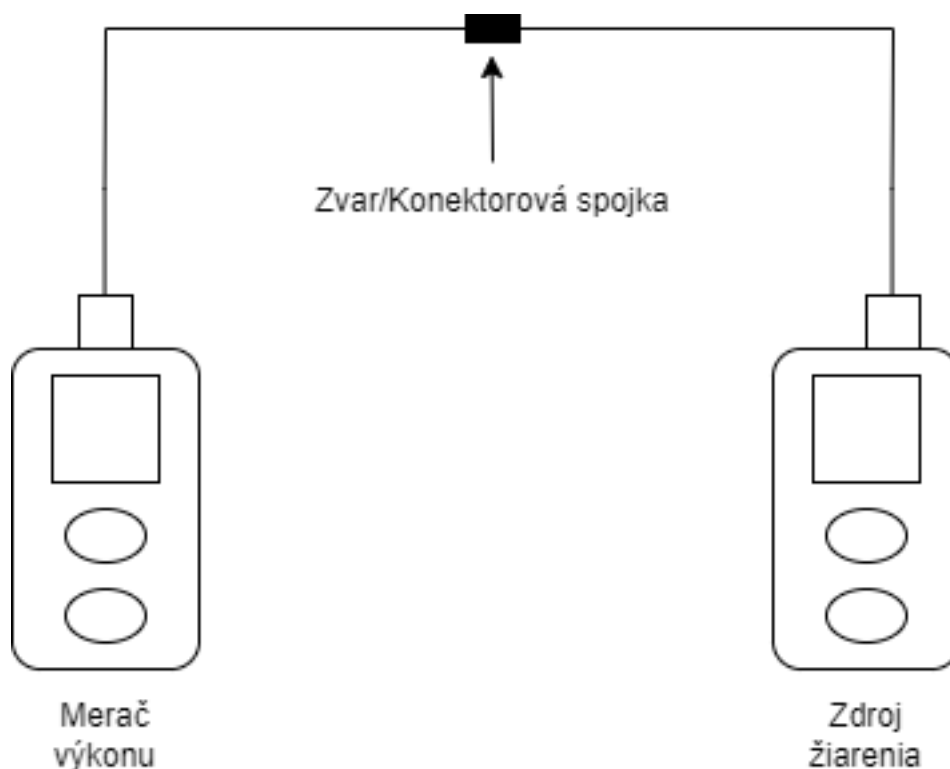
Obr. 3.4: Meranie útlmu odrazu transmisnou metódou [17]

3.2.2 Metóda spätného rozptylu

OTDR metóda vyhodnocuje útlm odrazu tým, že špočíta celkové odrazené svetlo a celkový spätný rozptyl od začiatku po koniec testovaného vlákna. Pred samotné vlákno je vhodné zapojiť predradné vlákno, rovnako ako v prípade merania útlmu, z dôvodu odstránenia mŕtvej zóny. Táto metóda je bližšie popísaná v podkapitole 3.1.3 [16]. Pri meraní sa vyhodnocuje amplitúda a plocha pod krivkou spätného rozptylu odrazu sa integruje. Táto metóda je pre meranie útlmu odrazu vhodnejšia, vzhľadom na to, že u väčšiny prístrojov sa meria spolu s útlmom aj útlm odrazu. Presnosť merania metódou OTDR je však nevýhodou, transmisná metóda v tomto výťazí [1].

4 Meranie parametrov optických spojov

V praktickej časti práce bolo prevedené meranie útlmu vlákien, ktoré boli spojené metódou zvárania. Taktiež bol skúmaný vplyv mechanických zmien na zmenu výkonu optického vlákna spojeného pomocou konektorov. Skumána bola aj stabilita samotných konektorov pri viacnásobnom rozpojení vlákien. Na overenie útlmu opticky zvarenej trasy a zmeny výkonu trasy, ktorá vznikla spojením vlákien pomocou konektorov bola použitá priama metóda, konkrétne metóda vložných strát. Použité boli prístroje - merač výkonu FOPM-102 a zdroj žiarenia FOLS-101. Zapojenie pracoviska je na obr.4.1.



Obr. 4.1: Schéma zapojenia meracej sústavy

4.1 Pevný spoj - zváranie

Pre spojovanie vlákien zvarom bola použitá zváračka AITELONG SAT – 17T , ktorá je vhodná pre spojovanie ako jednovidových, tak aj viacvidových vlákien. Priemerný vložný útlm sa pri jednovidových vláknach pohybuje okolo 0,02 dB a pre mnohovidové vlákna činí hodnotu 0,01 dB. Použitá bola taktiež zalamovačka optických vlákien CA – 17. Boli spojené dva jednometrové jednovidové vlákna 9/125 μm , zakončené pigtailmi SC/APC, pre následné meranie útlmu priamou metódou.

Ako prvé boli vlákna opatrené plastovou zmrštitelnou trubkou, ktorá ochráni výsledný zvar, zbavené primárnej a sekundárnej ochrany pomocou zdrhovačky na optické vlákna a následne boli vlákna očistené liehom. Po skontrolovaní čistoty vlákien, boli vlákna zalomené v zalamovačke pre dokonale hladký koniec vlákien. Takto pripravené vlákna boli uložené do zväračky, kde prebehlo nastavovanie ôs x a y automaticky. Celkový čas zvaru spolu s nastavovaním vlákien trval približne 4 s, samotný zvar približne 0,3 s a zväračka vyhodnotila útlm hodnotou 0,01 dB.

Následne bol útlm takto zavreného vlákna premeraný priamou metódou, kde sme dostali hodnotu útlmu 0,01 dB. Optické vlákno bolo 10x rozlomené a opätovne zvarené, aby bolo overené, či sa útlm takto zvarného vlákna mení. Hodnoty sú prehľadne spísané v tabuľke. Meranie útlmu prebiehalo na vlnovej dĺžke 1310 nm.

Tab. 4.1: Vyhodnotenie strát pri zváraní optických vlákien

Zvar č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zalomenie L [°]	1,14	0,14	0,88	1,15	1,25	0,85	1,54	0,70	0,61	2,12
Zalomenie R [°]	2,51	0,21	0,68	0,63	0,14	1,30	1,1	1,37	1,17	1,18
Útlm na zvare [dB]	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Celkový útlm trasy [dB]	0,01	-0,03	-0,08	-0,01	-0,03	-0,02	-0,02	0,03	-0,04	0,02

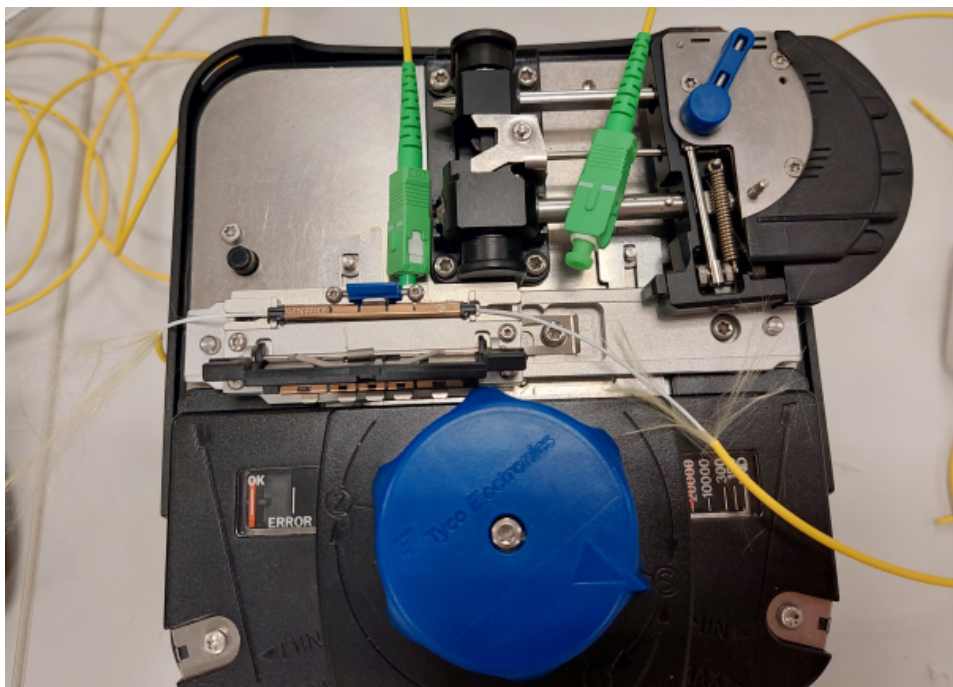
Z tabuľky je zreteľné, že útlm sa v priemere pohyboval na úrovni -0,02 dB. V prípade niekoľkonásobného rozlomenia a zlomenia vlákna a opätovného zvaru, nedochádza k veľkým rozdielom útlmu. V prípade zvaru č.3 bol nameraný najväčší útlm zvaru a aj celkovej optickej trasy. To mohlo byť najpravdepodobnejšie spôsobené zlým zalomením, prípadne očistením vlákna. Aj napriek tomuto skoku útlmu, je však celkový útlm viac-menej stabilný. Vložný útlm zvaru bol pod rozlišovacou schopnosťou prístroja.

4.2 Pevný spoj - mechanická spojka

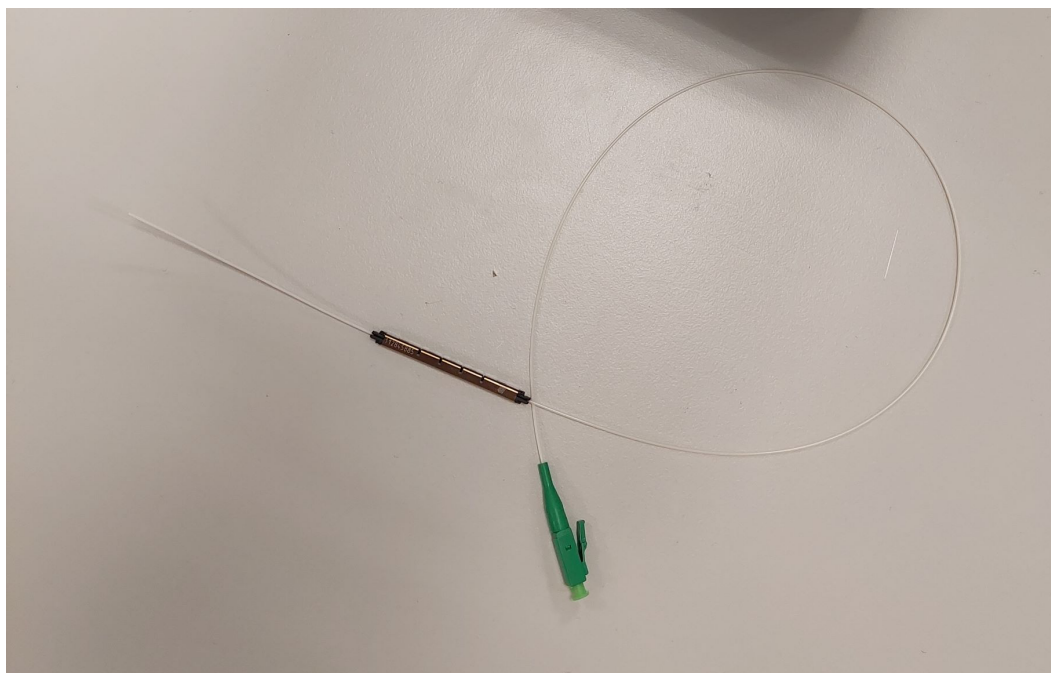
V prípade tohto pevného spoja bol použitý prístroj od firmy Tyco Electronics - RECORDsplice. Tento prístroj sa používa pre spojovanie optických vlákien pomocou mechanických spojok RPI-SA100. Použitie vlákno bolo jednodvidové o priemere plášťa 125 μm . Toto vlákno bolo oholené v požadovanej dĺžke. V prípade nutnosti je možné si dĺžku vlákna skontrolovať v prednej časti prístroja. Po správnom oholení, je nutné oholené vlákno očistiť liehom a zalamiť v zalamovačke vlákien. Po príprave vlákna je možné pristúpiť k príprave spojky a samotného prístroja.

Pred vložení spojky do prístroja je nutné odstrániť záslepky z oboch strán spojky. Následne môže byť spojka vložená do prístroja. Vyklápacia časť za zdvihne

do vodorovnej polohy, zascvakne sa na dol a modrý otočný mechanizmus sa zavedie do pozície 1. Následne je nutné modré páčky na vyklápacej časti dať do polohy I - je nutné páčky držať v tejto polohe a súčasne vsúvať vlákno do prístroja. Že je vlákno správne zasunuté nám značí vlnenie vlákna a prsty sa dotýkajú hornej časti vyklápacej časti. Po správnom zasunutí vlákna je nutné páčky na vyklápacej časti posunúť do polohy III a následne IIII, čím sa vlákno zaistí. Modrý otočný mechanizmus je možné otočiť do pozície 2. Ak je všetko v poriadku, na prístroji sa zobrazí v dolnej časti znak OK. V prípade zle zalomeného vlákna, či jeho nesprávne založenie do prístroja je indikované chybovým znakom ERROR. V tomto prípade je nutné vlákno vybrať opätovným držaním páčiek na vyklápacej časti v polohe I a pokračovať ďalej v procese spájania bez vlákna, čím sa resetuje celý proces. V prípade znaku OK, vysunieme vyklápaciu časť a položíme do opačnej strany, než je položená spojka. Zasunieme, dávame pozor aby sa vlákno neohlo, správne zasunutie nám indikuje zvuk zacvaknutia a následne otočíme modrý otočný mechanizmus do polohy medzi S a I a späť do S. Opatrne výjmemo vlákno z prístroja držaním páčiek na vyklápacej časti v polohe I a otvoríme zaklápaciu časť, kde je uložená spojka. Rovnakým spôsobom opakujeme proces pre druhý koniec vlákna. Výsledný mechanický spoj je možné vidieť na obr. 4.2 a 4.3, kde je možné vidieť aj samotné uloženie spojky a prístroj samotný.



Obr. 4.2: Optické vlákno č.1 spojené pomocou mechanickej spojky



Obr. 4.3: Optické vlákno č.2 spojené pomocou mechanickej spojky

V porovnaní so zvaraním je spojovanie takýmto spôsobom zdĺhavejšie. Oproti 3s zvaru trvalo celé spojenie pomocou mechanickej spojky približne 5 minút. Spojka sa taktiež nedá rozoberať, a spoj nie je ohybný. Tento typ spojovania je vhodný pre prostredia, kde nie je veľká záťaž na vlákno a nie je nutné spoj viackrát rozpojovať. Oproti zvaraniu je však výhodou menšia pravdepodobnosť rozlomenia celého spoja. Mechanická spojka má dlhú životnosť, na druhej strane dĺžka celého spoja je oproti zvaru omnoho dlhšia.

4.3 Konektorový spoj

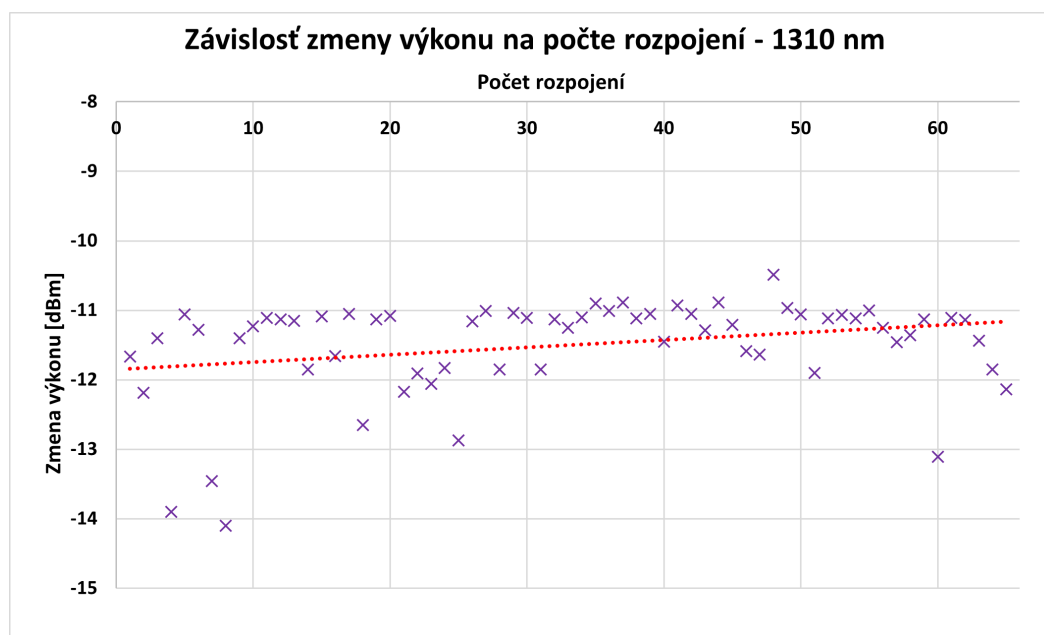
Pri konektorom spojení boli vybrané tri druhy optických konektorov, a to FC/APC, E2000 a LC/PC. Všetky optické vlákna s vybranými konektormi boli zakončené konektorom SC/APC pre pripojenie do meracej sústavy priamej metódy. Meranie prebehlo na dvoch vlnových dĺžkach – 1310 nm a 1550 nm. Odčítané hodnoty sú v jednotkách dBm. Ako prvá bola zisťovaná stabilita konektora pri viacnásobnom rozpojení a opätovnom spojení konektorov. Následne sa vyhodnotila mechanická odolnosť konektora zmenou výkonu pri záťaži konektora a vlákna samotného.

4.3.1 Optické vlákna s konektormi FC/APC

Pre tento konektorový spoj boli použité SM 9/125 μm optické vlákna o spoločnej dĺžke 2m. Optické vlákna boli prepojené cez konektorovú spojku. Optický merač bol skalibrovaný a následne bolo nameraných 65 hodnôt zmeny výkonu pre 1310 nm a 1550 nm. V tabuľke je zaznačených 30 hodnôt, všetky výsledky nameraných hodnôt sú v prílohe v tabuľke A.1. Závislosti zmien výkonov na počte rozpojení boli pre obidve vlnové dĺžky následne vynesené do grafov.

Tab. 4.2: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora FC/APC pri vlnovej dĺžke 1310 nm.

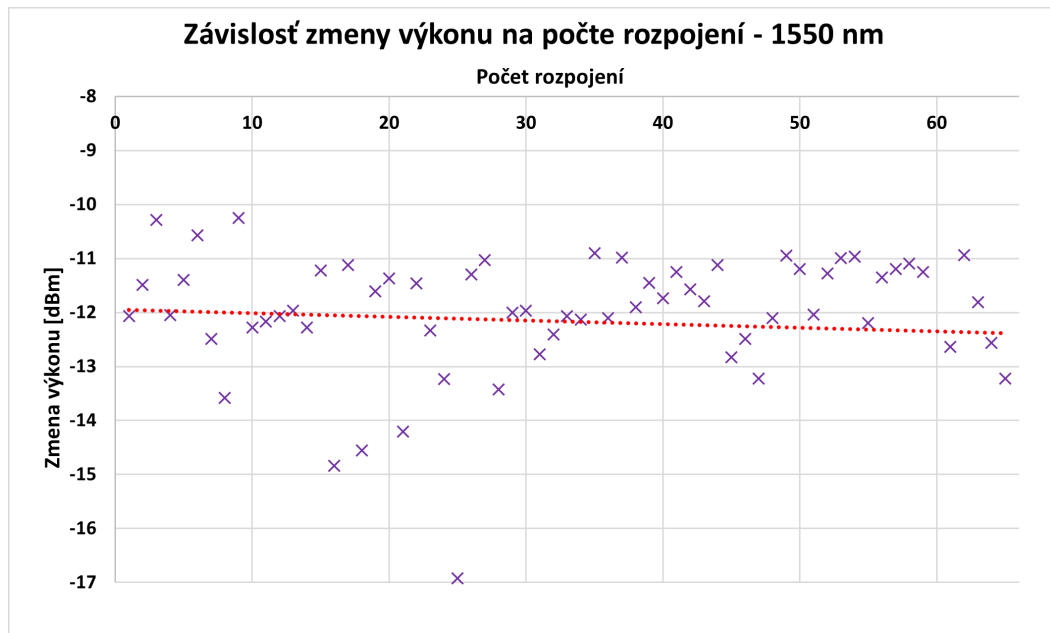
Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Úroveň výkonu [dBm]	-11,67	-12,19	-11,40	-13,90	-11,06	-11,28	-13,46	-14,10	-11,40	-11,23
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Úroveň výkonu [dBm]	-11,11	-11,13	-11,15	-11,85	-11,09	-11,66	-11,05	-12,65	-11,13	-11,08
Počet rozpojení	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Úroveň výkonu [dBm]	-12,17	-11,91	-12,06	-11,83	-12,87	-11,16	-11,01	-11,85	-11,04	-11,11



Obr. 4.4: Graf závislosti zmeny výkonu na počte rozpojení konektora FC/APC pri vlnovej dĺžke 1310 nm

Tab. 4.3: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora FC/APC pri vlnovej dĺžke 1550 nm.

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Úroveň výkonu [dBm]	-12,07	-11,49	-10,29	-12,05	-11,40	-10,57	-12,49	-13,58	-10,25	-12,28
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Úroveň výkonu [dBm]	-12,17	-12,07	-11,97	-12,28	-11,22	-14,84	-11,12	-14,55	-11,61	-11,37
Počet rozpojení	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Úroveň výkonu [dBm]	-14,21	-11,46	-12,33	-13,23	-16,92	-11,30	-11,03	-13,43	-12,00	-11,97



Obr. 4.5: Graf závislosti zmeny výkonu na počte rozpojení konektora FC/APC pri vlnovej dĺžke 1550 nm

Ako môžeme vidieť, či už z grafu, alebo z tabuľky, zmena útlmu je pri viacnásobnom rozpojovaní výrazná. Väčšie zmeny výkonu nastali pri meraní na vlnovej dĺžke 1550 nm. Z dôvodu toho, ako veľmi zmena výkonu kolísala, bolo nutné spraviť až 65 rozpojení a spojení, aby sme overili, či je konektor naozaj menej stabilný alebo sa jedná o problém v rozpojovaní. Na základe uvedených skutočností je však možné povedať, že v našom prípade tento typ konektora nie je piliš vhodný do prostredí, kde je nutné časté rozpojovanie a opätovne spojovanie, konektor reaguje na tieto úkony výraznejšou zmenou výkonu.

Po ukončení merania bolo pristúpené k meraniu zmien výkonu konektora pri mechanickej záťaži. Bolo prevedených 14, tzv. záťažových testov, či už na vlákne alebo na samotnom spoji a konektore pre zistenie, ako ďaleko je možné zájsť, aby nebol útlm spoja príliš vysoký. Cieľom bolo overiť, či aj napriek menešej stabilite pri rozpojovaní, konektor dokáže zvládnuť mechanicke záťaž. Zmeny pre obidve vlnové dĺžky sú prehľadne zobrazené v tabuľkách.

Tab. 4.4: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora FC/APC pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1310 nm.

Mechanická záťaž č.	1	2	3	4	5	6	7
Úroveň výkonu [dBm]	-11	-36,79	-39,17	-14,20	-18,92	30,20	-39,27
Mechanická záťaž č.	8	9	10	11	12	13	14
Úroveň výkonu [dBm]	-36,70	-46,72	-12,10	-13,59	-22,35	-38,21	-50

Tab. 4.5: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora FC/APC pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1550 nm.

Mechanická záťaž č.	1	2	3	4	5	6	7
Úroveň výkonu [dBm]	-11,39	-12,39	-26,25	-22,49	41,32	-43,79	-42,09
Mechanická záťaž č.	8	9	10	11	12	13	14
Úroveň výkonu [dBm]	-37,65	-48,04	-12,33	-27,40	-28,49	-35,84	-49,31

Legenda:

- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Bez zmeny | 8. Konektor bez dotiahnutia |
| 2. Povolenie jedného konektora | 9. Konektory bez dotiahnutia |
| 3. Povolenie oboch konektorov | 10. Znečistenie čiel konektorov |
| 4. Ohnutie vlákna pri konektore | 11. Ohnutie jedného konektora |
| 5. Ohnutie vlákien pri konektoroch | 12. Ohnutie oboch konektorov |
| 6. Ohnutie vlákna za konektorom | 13. Nesprávne zasunutý konektor |
| 7. Ohnutie vlákien za konektormi | 14. Nesprávne zasunuté konektory |

4.3.2 Optické vlákna s konektormi E2000

Rovnako ako pri predchádzajúcom spoji, aj tu boli použité jednovidové optické vlákna o spoločnej dĺžke 2m a prepojené cez konektorovú spojku. Bolo prevedených 30 meraní rozpojenia a opätovného spojenia pre každú vlnovú dĺžku. Hodnoty sú zapísané v tabuľkách a vynesené do grafov.

Tab. 4.6: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora E2000 pri vlnovej dĺžke 1310 nm.

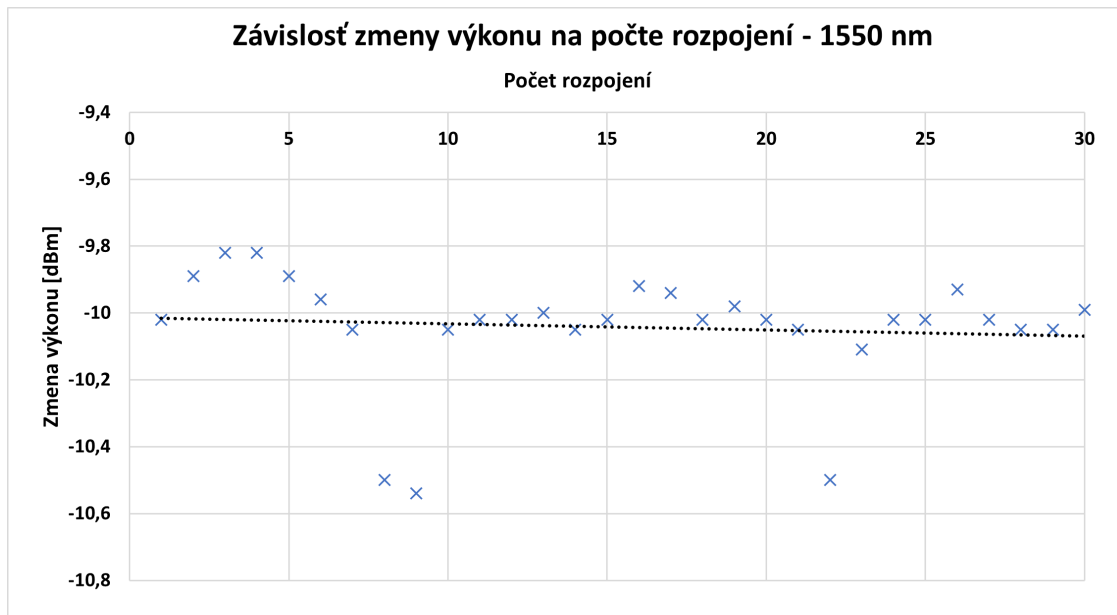
Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Úroveň výkonu [dBm]	-9,95	-9,70	-9,71	-9,72	-9,80	-9,70	-9,98	-10,45	-10,77	-9,93
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Úroveň výkonu [dBm]	-9,99	-9,94	-9,94	-9,97	-9,94	-9,84	-9,82	-9,95	-9,82	-9,92
Počet rozpojení	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Úroveň výkonu [dBm]	-9,82	-10,02	-9,86	-9,93	-9,92	-9,78	-9,92	-9,94	-9,99	-9,98



Obr. 4.6: Graf závislosti zmeny výkonu na počte rozpojení konektora E2000 pri vlnovej dĺžke 1310 nm

Tab. 4.7: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora E2000 pri vlnovej dĺžke 1550nm.

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Úroveň výkonu [dBm]	-10,02	-9,89	-9,82	-9,82	-9,89	-9,96	-10,05	-10,50	-10,54	-10,05
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Úroveň výkonu [dBm]	-10,02	-10,02	-10,00	-10,05	-10,02	-9,92	-9,94	-10,02	-9,98	-10,02
Počet rozpojení	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Úroveň výkonu [dBm]	-10,05	-10,50	-10,11	-10,02	-10,02	-9,93	-10,02	-10,05	-10,05	-9,99



Obr. 4.7: Graf závislosti zmeny výkonu na počte rozpojení konektora E2000 pri vlnovej dĺžke 1550 nm

Z uvedených hodnôt a grafu je zreteľné, že zmena útlmu, pri viacnásobnom rozpojovaní a spojovaní, nie je až tak výrazná ako v prípade konektora FC/APC. Konektor E2000 je teda možné z tohto dôvodu určiť za konektor, ktorý je vhodný do priestorov, kde je nutné časté rozpojovanie a spojovanie optických vlákien. Na oboch grafoch je možné si všimnúť, že pri troch rozpojovaniach bola zmena výkonu razantná. To mohlo byť spôsobené nepresným zasunutím konektora do spojky, prípadne nečistotami, ktoré sa na čele konektora mohli pri rozpojovaní dostať.

Po ukončení merania rozpojovania konektorov, sa opäť pristúpilo k záťažovým testom. Bolo prevedených 14 spôsobov ohybu, krútenia či znečistenia konektora a vlákna samotného pre obidve vlnové dĺžky, aby sme overili mechanické vlastnosti daného konektora. Výsledné hodnoty sú zaznačené v tabuľke. Z nameraných hodnôt je možné určiť, že konektor je pri niektorých mechanických zmenách viac náchylný na zvyšovanie útlmu než konektor FC/APC. O niečo lepšie hodnoty boli dosiahnuté pri vlnovej dĺžke 1310 nm.

Tab. 4.8: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora E2000 pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1310nm.

Mechanická záťaž č.	1	2	3	4	5	6	7
Úroveň výkonu [dBm]	-9,93	-41,95	-50	-39,60	-50	-11,17	-50
Mechanická záťaž č.	8	9	10	11	12	13	14
Úroveň výkonu [dBm]	-28,20	-35,28	-10,25	-17,59	-35,69	-11,59	-13,59

Tab. 4.9: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora E2000 pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1550nm.

Mechanická záťaž č.	1	2	3	4	5	6	7
Úroveň výkonu [dBm]	-9,81	-43,97	-50	-46,40	-50	-19,45	-50
Mechanická záťaž č.	8	9	10	11	12	13	14
Úroveň výkonu [dBm]	-25,51	-38,85	-10,07	-16,99	-38,70	-10,59	-12,39

Legenda:

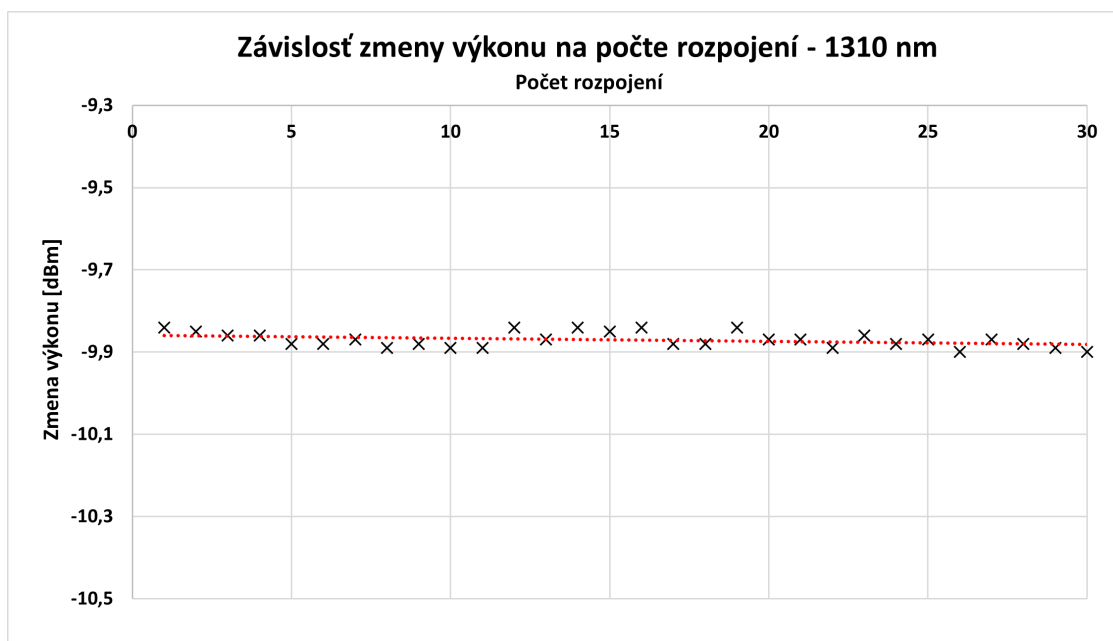
- | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Bez zmeny | 8. Nalomenie jedného konektora |
| 2. Povolenie jedného konektora | 9. Nalomenie oboch konektorov |
| 3. Povolenie oboch konektorov | 10. Znečistenie čiel konektorov |
| 4. Ohnutie vlákna pri konektore | 11. Ohnutie jedného konektora |
| 5. Ohnutie vlákien pri konektoroch | 12. Ohnutie oboch konektorov |
| 6. Ohnutie vlákna za konektorom | 13. Cudzie teleso v jednej spojke |
| 7. Ohnutie vlákien za konektormi | 14. Cudzie teleso v druhej spojke |

4.3.3 Optické vlákna s konektormi LC/PC

Rovnako ako pri predchádzajúcom spoji, aj tu boli použité optické vlákna o dĺžke 2m a prepojené cez konektorovú spojku. Bolo prevedených 30 meraní rozpojenia a opätovného spojenia pre obidve vlnové dĺžky. Hodnoty sú zapísané v tabuľkách a závislosti vynesené do grafov.

Tab. 4.10: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora LC/PC pri vlnovej dĺžke 1310 nm.

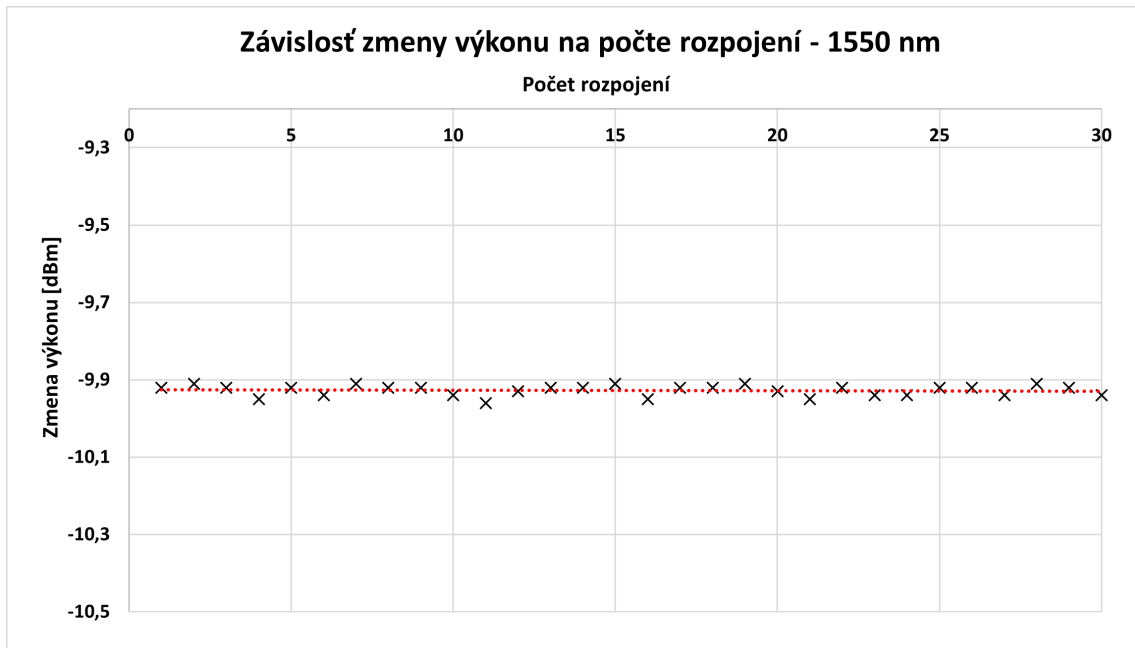
Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Úroveň výkonu [dBm]	-9,84	-9,85	-9,86	-9,86	-9,88	-9,88	-9,87	-9,89	-9,88	-9,89
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Úroveň výkonu [dBm]	-9,89	-9,84	-9,87	-9,84	-9,85	-9,84	-9,88	-9,88	-9,84	-9,87
Počet rozpojení	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Úroveň výkonu [dBm]	-9,87	-9,89	-9,86	-9,89	-9,87	-9,90	-9,87	-9,88	-9,89	-9,90



Obr. 4.8: Graf závislosti zmeny výkonu na počte rozpojení konektora LC/PC pri vlnovej dĺžke 1310 nm.

Tab. 4.11: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora LC/PC pri vlnovej dĺžke 1550 nm.

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Úroveň výkonu [dBm]	-9,92	-9,91	-9,92	-9,95	-9,92	-9,94	-9,91	-9,92	-9,92	-9,94
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Úroveň výkonu [dBm]	-9,96	-9,93	-9,92	-9,92	-9,91	-9,95	-9,92	-9,92	-9,91	-9,93
Počet rozpojení	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Úroveň výkonu [dBm]	-9,95	-9,92	-9,94	-9,94	-9,92	-9,92	-9,94	-9,91	-9,92	-9,94



Obr. 4.9: Graf závislosti zmeny výkonu na počte rozpojení konektora LC/PC pri vlnovej dĺžke 1550 nm.

Z nameraných hodnôt je možné určiť, že rovnako ako v prípade konektora E2000 nemá viacnásobné rozpojovanie príliš veľký vplyv na zmenu útlmu konektora. Konektor je teda vhodný do prostredí, kde je nutné opätovné spojovanie a rozpojovanie optických vlákien.

Po ukončení merania rozpojovania konektorov, bolo pristúpené k vykonaniu záťažových testov. Bolo prevedených 14 spôsobov záťažových testov konektora a vlákna samotného, aby sa overili mechanické vlastnosti daného konektora. Výsledné hodnoty sú zaznačené v tabuľke. Ako je možné vidieť, konektor je najmenej náchylný na mechanické zmeny.

Tab. 4.12: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora LC/PC pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1310 nm.

Mechanická záťaž č.	1	2	3	4	5	6	7
Úroveň výkonu [dBm]	-10,66	-18,23	-38,20	-50	-50	-10,23	-11,35
Mechanická záťaž č.	8	9	10	11	12	13	14
Úroveň výkonu [dBm]	-24,49	-41,23	-10,45	-25,18	-26,31	-24,20	-50

Tab. 4.13: Absolútne hodnoty zmeny výkonu konektora LC/PC pri mechanickej záťaži - vlnová dĺžka 1550nm.

Mechanická záťaž č.	1	2	3	4	5	6	7
Úroveň výkonu [dBm]	-9,86	-17,11	-36,90	-50	-50	-9,95	-10,05
Mechanická záťaž č.	8	9	10	11	12	13	14
Úroveň výkonu [dBm]	-23,59	-39,50	-10,17	-23,54	-36,24	-24,66	-50

Legenda:

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Bez zmeny | 8. Nalomenie jedného konektora |
| 2. Povolenie jedného konektora | 9. Nalomenie oboch konektorov |
| 3. Povolenie oboch konektorov | 10. Sila na konektory |
| 4. Ohnutie vlákna pri konektore | 11. Cudzie teleso v jednej spojke |
| 5. Ohnutie vlákien pri konektoroch | 12. Cudzie teleso v druhej spojke |
| 6. Znečistenie čela jedného konektora | 13. Poškodenie jedného konektora |
| 7. Znečistenie čiel oboch konektorov | 14. Poškodenie oboch konektorov |

Z nameraných hodnôt, ale aj z priebehov jednotlivých závislostí, je možné vidieť, že najlepšie si počínalo vlákno zakončené konektorom LC/PC. Najhoršie obstál konektor FC/APC, kde boli skoky jednotlivých úrovní napätí pri viacnásobnom rozpojovaní veľmi výrazné. Ak by sa mali namerané hodnoty porovnať s teoretickými poznatkami, výsledky sú prekvapujúce len v prípade konektora FC s ferulou APC. APC ferula by mala poskytovať menšie straty a väčšiu odolnosť voči rozpojovaniu. Dôvodom mohla byť zle skalibrovaná meracia sústava, poprípadne znečistené čelá jednotlivých konektorov. Naopak je známe, že konektor LC sa hodí práve do prostredí, kde sú optické spoje vysoko zaťažené. Konektor E2000, ktorý je európskym štandardom pre telekomunikácie, si v teste počínal dobre, a na viacnásobné rozpojovanie reagoval tak, ako sme očakávali. V prípade mechanickej záťaže, konkuroval konektoru FC/APC, keďže niektoré mechanické zmeny zvládal horšie, v iných naopak vyhrával. Pri mechanickej záťaži opäť vyhral konektor LC/PC, ale to už, z dôvodom teoretických znalostí, nie je vôbec prekvapujúce.

Pri porovnaní konektorových spojení a spojení, ktoré vznikli zvarom, je jasné, že opticky zvarový spoj je stále jednou z najlepších možností spojovania optických vlákien. Aj napriek vianásobnému zalomeniu a opätovnému zvarovaniu, bol útlm stabilný. Konektor LC/PC sa v prípade nášho merania radí tesne za opticky zvarový spoj. Pri porovnaní s teoretickými poznatkami je jasné, že v prípade opticky zvarového spoja k výkyvom útlmu nedochádza, naopak zmeny nastávajú pri konektorom spojení a manipulácií s káblom samotným.

5 Optimalizácia procesu zvárania pre minimalizáciu dĺžky spoja

Za normálnych okolností nie je možné dosiahnuť, aby bol každý zvarovaný optický spoj rovnako dlhý a krátky. Bolo by to jednak časovo ale aj finančne náročné. Z tohto dôvodu je nutné zvarovaný optický spoj minimalizovať, aby bolo v prípade nutnosti zabezpečený krátky ale kvalitný optický spoj. V domácich podmienkach, ale aj v tých laboratórnych nie je vždy možné docieľiť rovnaké oholenie a zalomenie vlákien, či ich polozenie do zväračky. Väčšinou sú optické vlákna zalomené nesúmerne, t.z. že oholené vlákna nemajú rovnakú dĺžku a spoj môže byť až príliš dlhý, alebo príliš krátky a menej kvalitný. Druhým problémom je konektor. V prípade ak chceme vlákno zvariť v blízkosti konektora, je tento úkon značne problematický. Bežné držiaky nie sú na konektory pripravené a vlákno je možné zvariť len v určitej vzdialenosti od konektora. Na zalomenie vlákien sa používajú dva typy zalamovačiek. Jedná sa o manuálnu zalamovačku, kde je zasunutie vlákna do zalamovačky pracné a častokrát nerovnomerné. Naopak, automatické zalamovačky dokážu zalamovať pod uhlom, ktorý je možné aj užívateľom nastaviť. Vo väčšine zalamovačiek je možné vymeniť držiak na vlákno a následne ho vložiť do zväračky.

V rámci semestrálnej práce bola použitá zalamovačka manuálna, kde je nutné vlákno položiť tak, aby bolo správne zalomené. Väčšinou je vlákno zalomené vždy v rovnakej dĺžke, ak je vlákno správne založené. V prípade nerovnomerného založenia vlákna do zalamovačky, dochádza k menej kvalitnému zlomu, čím sa prejavuje aj menšia kvalita výsledného optického spoja. Zároveň je vlákno v niektorých prípadoch zbytočne dlhé. Z tohto dôvodu je lepšie použiť zalamovačku automatickú, kde sa aspoň z časti eliminuje nerovnomernosť zalomenia vlákna. Uloženie vlákna do zalamovačky je však práca človeka samotného.

Optické vlákna boli v semestrálnej práci zvarované pomocou zväračky SAT-17T. Už zo samotného zvárania bolo možné vidieť, že vlákna sú v niektorých prípadoch príliš dlhé a vlákno je nutné oholiť vo väčšej dĺžke. Najdôležitejšou časťou spojovania optických vlákien je tak samotné zváranie a práve tu vznikajú najväčšie nerovnomernosti.

A preto som sa v mojej bakalárskej práci pokúsil navrhnuť a odskúšať model držiakov vlákien na dosiahnutie vždy rovnako dlhého a krátkeho opticky zvarovaného spoja. Na demonštrovanie jednotlivých návrhov bola použitá zväračka Fitel S122, kde bolo možné si všetky potrebné znalosti odskúšať. Zväračka je vhodná pre zváranie bežných jedno- a viac-vidových vlákien o priemere 125 μm . Zväračka sa vyznačuje nízkym útlmom výsledných zvarov. Návrhy boli nakreslené v programe AutoCAD Fusion 360 a následne vytlačené na 3D tlačiarňi. [18].

5.1 Magnetické držiaky na vlákno

Jedným z návrhov boli držiaky na vlákno s magnetmi. Držiaky sú vymeniteľné a sú vhodné ako do zalamovačiek tak zväračiek. Odpadá nutnosť vlákno pracne presúvať zo zalamovačky do zväračky, čím sa spoj minimalizuje. Držiak je možné po zalomení v zalamovačke spolu s vláknom preložiť do zväračky. Je nutné mať zalamovačku, do ktorej je vhodné takýto držiak umiestniť. Držiak bol vysunutý viac smerom do vnútra zväračky, aby bolo možné zaistiť minimalizovaný spoj. Bežný držiak, vhodný do tejto zväračky má rozmery 5 x 1,5 x 0,7 cm. Môj, navrhnutý, má rozmery 5,4 x 1,8 x 1,2 . V držiaku bolo taktiež vytvorené miesto pre pigtail FC/APC - výklenok na pigtail má dĺžku 3,34 cm . Pri bežnom zváraní nie je možné vlákno zvariť v blízkosti pigtailu. Je to z toho dôvodu, že držiak na takýto pigtail nie je stavaný a pri pokuse o vloženie pigtailu do priestoru zväračky, zväračka nie je schopná takýto zvar spraviť. Preto bolo v časti na vlákno vytvorené miesto na vloženie pigtailu, aby bolo možné vlákno zvariť aj v tesnej blízkosti zakončenia vlákna. Vysunutie držiaka spôsobí to, že samotné vlákno bude bližšie k hrotom zväračky a nie je nutné ho tým pádom oholiť vo veľkej dĺžke. Takto docielime minimalizovaný zvarový spoj.

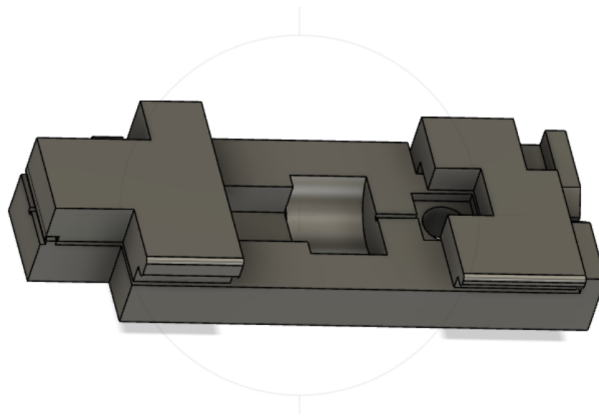


Obr. 5.1: Magnetický držiak na vlákno - návrh č.1

Navrhnutý držiak je z väčšej časti z plastu, až na pomocné magnety. Držanie vlákna je zaistené magnetickou svorkou, teda zaklápacou časťou. Magnet, ktorý zaistuje držanie vlákna , prípadne vlákna s pigtailom je kvádrový neodymový o rozmeroch 10 x 4 x 1 mm. V spodnej časti sa nachádza neodymový magnet kruhový, ktorý zaistuje zaistenie držiaku v zväračke. Magnet má priemer 2 mm a výšku 0,08 mm. Na držiaku sa nachádzajú V drážky na zaistenie vlákna. Návrh držiakov je možné vidieť na obr. 5.1. Nevýhodou samého produktu je odchýlka pri navrhovaní a väčšia náročnosť pre niektoré typy 3D tlačiarň, ktoré môžu mať s vytlačením takéhoto produktu problém. Taktiež nebolo možné navrhnúť držiak pre typ SC/APC, ktorý je častejšie používaný. Zväračka by takýto držiak už nepoňanala a v prípade vloženia iného pigtailu, by tento v držiaku nedržal správne.

Taktiež nevýhodou je nutnosť mať zaklápaciu časť vyšších rozmerov, čím je aj samotný otvor na pigtail zmenšený a príliš tesný. Pri samotnej tlači bolo zistené, že otvor na konektor je až príliš tesný a spoj by nebol kvalitný.

Druhým typom magnetických držiakov sú držiaky, ktoré majú len samotnú spodnú časť a výrez priamo na pigtail FC/APC. V držiaku sa nachádzajú V drážky pre samotné vlákno a výrezy pre vlákno oholené. Rozmery činia 5,4 x 1,9 x 0,7cm. Vrchná, zaklápacia časť sa v tomto prípade rozdelila na dve menšie časti, ktoré prichytávajú samotné vlákno na dvoch miestach. Pigtail je teda priamo zapadnutý do spodnej časti. Magnety, ktoré zaisťujú držanie vlákna na konci držiaka sú kvádrové neodymové o rozmeroch 10 x 5 x 1 mm a navzájom sa priťahujú. Magnet, ktorý zabezpečuje zaklapnutie a držanie vlákna v prednej časti je kruhový o priemere 2 mm. Jeho držanie zabezpečuje kovová páska v spodnej časti držiaku. Návrh je možné vidieť na obr. 5.2. Držanie oholeného vlákna vo svojej polohe zabezpečuje molitan, pre ktorý bol držiak v prednej časti zo spodku vyfrézovaný približne o 2 mm. Výhodou je posunutie V drážiek bližšie k zvarovej časti, väčší priestor pre pig tail a menšia náročnosť samotnej tlače. Nevýhodou je rovnako v prípade predchádzajúcich držiakov odchýlka pri navrhovaní a nepresnosť tlače. Pre potreby laboratórnej úlohy bol použitý návrh práve týchto dvoch držiakov.

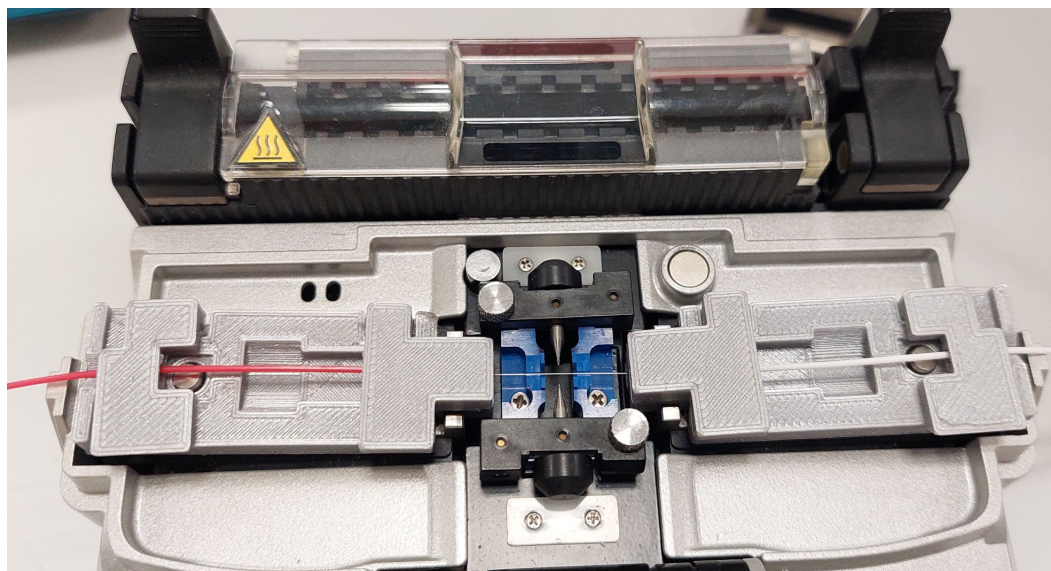


Obr. 5.2: Magnetický držiak na vlákno - návrh č.2

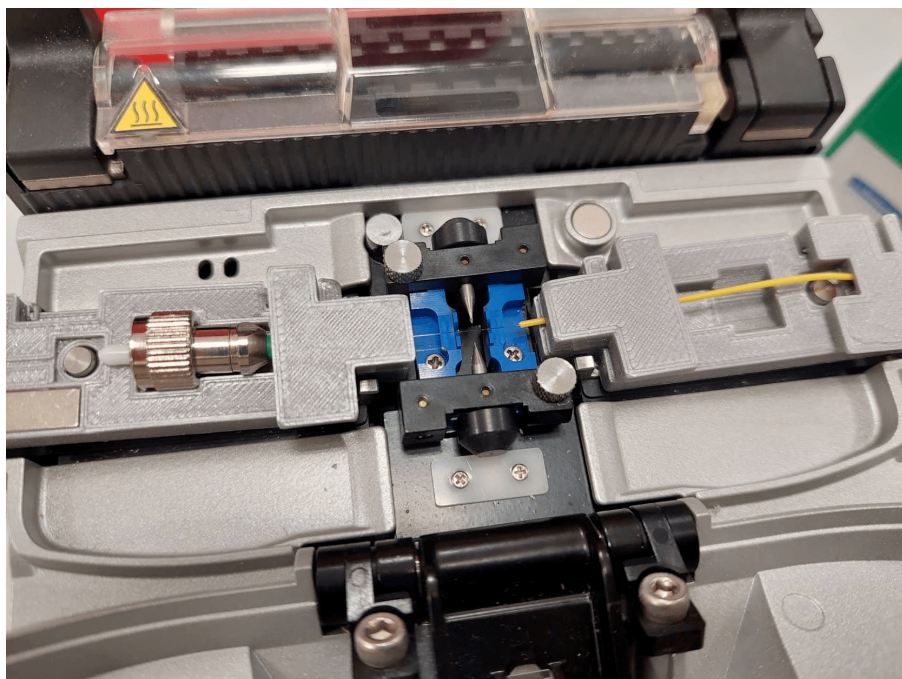
5.2 Testovanie návrhu pre minimalizáciu spoja

V prípade otestovania návrhu boli použité držiaky z návrhu č.2, spomínaných vyššie. Po tlačení však došlo k problémom, ktoré sme očakávali. V prípade tlače na 3D tlačiarňu pri niektorých typoch dochádza k nesprávnemu vytlačeniu určitých častí držiakov. Napríklad diery na založenie kovovej tyčky pre správne udržanie držiakov boli vytlačené zaslepené, bez možnosti akokoľvek tieto diery odlsepíť. Z tohto dôvodu bol držiak vytlačený ešte raz na inej 3D tlačiarňu, kde už k týmto problémom nedochádzalo.

Nastavenie držiakov do zväračky FITEK S122 bolo bezproblémové. Držiaky držali v poriadku v zväračke, nič nebránilo príprave vlákien a ich založenie do držiakov. Vlákno v držiaku držalo, je však nutné použiť v prednej časti väčší magnet na zabezpečenie hrubšieho vlákna - napríklad pri zasunutí konektora do výklenku už malý magnet v prednej časti nedokázal udržať vlákno vždy v rovnakej polohe. Zväračka mala na začiatku s vláknami problém, bolo nutné vlákna viackrát vybrať a položiť naspäť. Tieto problémy však mohli byť spôsobené aj nečistotou zrkadla, či V drážok v zväračke. Po pár nastaveniach však bol zvar hotový a zväračka zvar vyhodnotila s útlmom 0 dB. Dĺžka takto minimalizovaného zvaru bola približne 2,5 cm. Výsledný zvar v zväračke je možné vidieť na obr. 5.3. Následne bol spravený zvar ešte jeden, priamo s pigtailom FC/APC, aby bola odskúšaná aj táto varianta minimalizovaného spoja. Takto zvarovaný spoj bol problémovnejší, pig tail musel byť pridržený ťažším predmetom. Príprava obidvoch koncov vlákna v zväračke bola zdĺhavá, zvar sa však podaril a je možné ho vidieť na obr. 5.4



Obr. 5.3: Ukážka minimalizovaného zvaru



Obr. 5.4: Ukážka minimalizovaného zvaru s pigtailom

V prípade týchto držiakov by bolo vhodné zmeniť typ držania vlákna, napríklad jedným držiakom vpredu, prípadne zmeniť jednotlivé výklenky na vlákno. Taktiež použitím väčšieho magnetu v prednej časti by sme zabezpečili lepšie držanie samotného vlákna. Zvar bol však aj napriek spomínaným neuhom v poriadku. Aby sme predišli problémom pri 3D tlači, bolo by na mieste zväčšiť zadnú časť o približne 1 mm, čím môžu byť diery na kovovú tyč väčšie a väčšina 3D tlačiarň by už s takýmto otvorom problém mať nemala. Vhodnou úpravou by bolo aj zväčšenie V drážiek v prednej časti držiaku, čím by bolo zabezpečené lepšie zapadnutie samotného oholeného vlákna. V prípade laboratórných podmienok je vhodné tieto držiaky upraviť tak, aby nedochádzalo k spomínaným problémom, a zvar bol rýchly a bezproblémový.

6 Obnova primárnej ochrany

V predchádzajúcej kapitole boli pripravené a odskúšané návrhy na minimalizáciu zvarového spoja. Zvarené optické vlákno je nutné ochrániť, čo je v našom prípade možné dosiahnuť napríklad zmrštiteľnými bužírkami, ktoré, vzhľadom na minimalizovanie spoja, je možné orezať tak, aby nebolo nutné použiť ich v bežne predávaných veľkostiach, čím je možné dosiahnuť viac ohybný spoj. Bužírky nám však stále neposkytujú rovnaký ohyb a ochranu ako iné možnosti ochrany zvarového vlákna. Najlepším riešením je obnova primárnej ochrany pomocou recoatera. Recoatery a samotné materiály sú však veľmi drahé a v prípade malej firmy, či v laboratórnych podmienkach Vysokej školy, je takmer nereálne si ich zaobstaráť. Z tohto dôvodu je vhodné rozmyšľať nad tým, ako obnoviť primárnu ochranu vlákna bez použitia samotného recoatera. Recoater využíva vaničku, do ktorej sa požadované vlákno uloží, a podľa typu vstrekovania, buď manuálneho alebo automatického sa na vlákno postupne nabaľuje recoatovací materiál. K recoateru sú nutné aj UV lampičky, kde samotný materiál vytvrdne. Tieto lampičky sa nachádzajú pod samotnou vaničkou, kde žiarenie ožiaruje samotné vlákno s recoatovacím materiálom. Celý proces je popísaný v podkapitole 2.3.1. Recoateri využívajú najčastejšie k obnove primárnej ochrany UV lampou vytvrdnuteľný akrylátový materiál, ktorého ceny sa pohybujú okolo 290 eur.

V mojej bakalárskej práci som sa z vyššie uvedených dôvodov zaoberal otázkou ako jednoduchšie a aj v laboratórnych podmienkach nahradiť prácu recoatera na obnovu primárnej ochrany. Boli pripravené návrhy, ktoré by čiastočne nahradili samotný recoater. Recoatovací materiál bol použitý zatvrdnuteľný akrylát od firmy THORLABS.

6.1 Návrh vaničky s UV LED

Najjednoduchším riešením by bol návrh založený na vaničke s otvorom v hornej časti pre naplnenie recoatovacím materiálom. Do vaničky by bol postupne liaty recoatovací materiál cez otvor, ktorý by bol priamo nad vláknom, cez pumpičku, do ktorej je zasunutý recoatovací materiál. Z pumpičky by bol do otvoru nad vláknom vstrekovaný materiál cez rúrku. Vanička by bola plastová, vo vnútri vaničky sú na spodnej a vrchnej strane výklenky pre silikonové pláty, medzi ktorými je medzera pre uloženie samotného zvarového vlákna. Vanička je celý čas zaklapnutá, po nanesení materiálu na vlákno žiari UV svetlo zo spodku vaničky, aby došlo k vytvrdnutiu materiálu. Vanička by bola určená pre obnovu ochrany 280 μm s maximálnou dĺžkou 100 mm.

Nevýhodou v tomto manuálnom spôsobe recoatovania je nepresnosť naniesenia recoatovacieho materiálu na vlákno - celé vlákno sa nemusí pokryť rovnomerne. Nevýhodou je taktiež aj nepresnosť uloženia zvarového vlákna do vaničky, t.z., že vlákno nemusí byť uložené vždy v stredovej polohe, čo môže viesť k nanieseniu materiálu aj mimo potrebnú zvarovú časť, čím je vlákno menej odolné a nerovnomerne pokryté recoatovacím materiálom. Je nutné vlákno obaliť tenkými vrstvami recoatovacieho materiálu, aby nedošlo k nezatvrdnutiu výslednej ochrany. Výhodou je jednoduchosť, čo znamená že v prípade laboratórnych podmienok, napríklad na Strednej alebo Vysokéj škole, sa môžu študenti týmto spôsobom zoznámiť s hlavnou funkciou recoatera.

6.2 Návrh vaničky s pomocou krokového motora

Ak by sme chceli použiť náhradu recoatera v laboratórnych podmienkach, je vhodnejšie spojiť návrh vaničky s krokovým motorom. Jednalo by sa o automatizovaný prístroj, naprogramovaný v Arduine za použitia krokového motora, vzduchovej pumpičky a relátka. Použité by boli držiaky z návrhu minimalizácie spoja, pomocou ktorých by bola zaistená stredová poloha vlákna vo vaničke. Vanička by obsahovala dva postranné držiaky na ktorých by boli prichytené držiaky so samotným vláknom a zadný výklenok, na ktorom by bol automatizovaný prístroj. Vzduchová pumpička by slúžila na zaistenie natlačenia recoatovacieho materiálu do samotnej vaničky. Pomocou krokového motora by bolo zaistené postupné naniesenie materiálu do silikónových plátov vo vaničke. Po nanesení požadovaného množstva by sa následne položilo vlákno s držiakmi do vaničky. Vanička by bola zaklapnutá a následne by bol materiál vytvrdnutý pomocou UV lediek v spodnej časti vaničky.

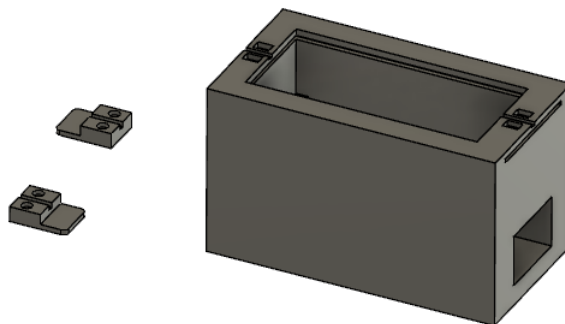
Alternatívou by mohol byť automatizovaný prístroj, kde by bolo vlákno položené na podstavci, a prístroj by s recoatovacím materiálom niekoľkokrát vlákno prešiel hore-dole a obalil by vlákno príslušným recoatovacím materiálom. Prístroj by sa skladal z krokového motora, vďaka ktorému by bolo zabezpečené otáčanie po vlákne. Prístroj by musel byť naprogramovaný tak, aby sa motor zastavil v časti kde vlákno oholené nie je, aby mohla byť vrstva materiálu adekvátne vytvrdnutá. Vstrekovanie materiálu by bolo zabezpečené cez otvor v prístroji, kde by sa materiál vstrekoval cez pumpičku a následne cez výklenok by vlákno bolo materiálom obalované. Týmto spôsobom odpadá pracné manuálne vstrekovanie recoatovacieho materiálu v návrhu vyššie a vlákno je obalené dôkladnejšie. Nevýhodou je čas, ktorý je potrebný na takéto obalenie a zatvrdnutie recoatovacieho materiálu. Je nutné počítať s tým, že materiál nie je automaticky zatvrdnutý po nanesení, je teda možné s ním pracovať, čím sa naskytá otázka, či by takto nanesený materiál bezprostredne po nanesení

nezišiel zo samotného zvaru. Je taktiež nutné zabrániť ďalšiemu posunu motora po vlákne aby nedošlo k poškodeniu jednej, či viacerých vrstiev materiálu. V tomto prípade je nutné vyriešiť otázku zatvrdnutia materiálu. To by bolo možné vyriešiť zabudovanou UV lampou v samotnom prístroji, prípadne by prístroj obaloval vlákno v dlhšom časovom úseku bez použitia UV lampy.

6.3 Testovanie obnovy primárnej ochrany

Už v semestrálnej práci bolo pri zváraní odskúšané že bužírky nie sú úplne najvhodnejšou metódou ochrany zvarového vlákna.

V prípade náhrady recoatera, ako napr. vyššie spomínané návrhy, konkrétne automatizovaný prístroj či vanička, ktorej dopomáha krokový motorom naprogramovaný cez arduino sa jedná o jedny z možných návrhov ako nahradiť úlohu recoatera. V rámci bakalárskej práce bol odskúšaný recoatovací materiál od firmy THORLABS. Tento návrh počíta s vaničkou na ktorej bolo vytvorené miesto na vloženie vlákna a obsahovala by dva magnetické držiaky, pomocou ktorých by bola neoholená časť vlákna prichytená k vaničke. Vanička má rozmery 5,5 x 3 x 3,33 cm a je vhodná pre obnovu primárnej ochrany zvaru o dĺžke maximálne 2,5 cm. V hornej časti sú výklenky pre neoholenú časť vlákna, pod vláknom sa nachádza silikónový plát pre zabránenie prenikaniu recoatovacieho materiálu na elektroniku. Navrh vaničky je na obr. 6.1.



Obr. 6.1: Vanička pre obnovu primárnej ochrany vlákna

Do vaničky by bola zasadená doska s UVC LED. UVC LED sa využívajú aj v recoateroch, ktoré sú dostupné na trhu, a poskytujú potrebnú svietivosť na zatvrdnutie recoatovacieho materiálu. Jednalo by sa o univerzálny plošný spoj, na ktorý by bolo napájkovaných 4 UVC LED, ktoré dosahujú svietivosť 350 mcd pri 15 mA a 3,4 V. Dopredný prúd konkrétnych UVC LED je 20 mA. LED diody boli zapojené sériovo. Doplnené by boli o 560 Ω rezistor s výkonom 0,4 W, spínačom a ako zdroj by bol použitý napájací adaptér 24 V. Schéma zapojenia je na obr. 6.2. Potrebný odpor rezistora bol vypočítaný pomocou vzorca:

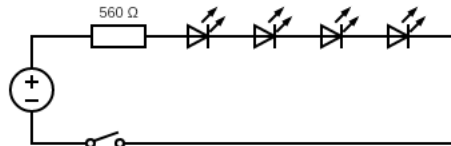
$$R = \frac{V - (V_F \cdot N_{LED})}{I_F} \quad [\Omega], \quad (6.1)$$

kde V je napätie zdroja, V_F je dopredné napätie UV LED, N_{LED} je počet UV LED a I_F je dopredný prúd UV LED.

Celkový výkon potrebný pre správne fungovanie celej zostavy sa vypočítal podľa:

$$R_{PW} = I_F \cdot R \quad [\text{W}], \quad (6.2)$$

I_F je dopredný prúd UV LED a R je odpor rezistora. V našom prípade vyšiel výkon rezistora 72 mW, odporúča sa však používať rezistor s dvojnásobnou hodnotou, ktorá činí 144 mW. V prípade pridania súčiastiek, či využitia iných LED bol zvolený rezistor s výkonom 400 mW [19].



Obr. 6.2: Schéma zapojenia UV LED

Tento proces obnovy ochrany bol odskúšaný na testovacom jednovidovom vlákne a menšej vaničke. Do vaničky bolo položené nami zvarené vlákno, zabezpečené magnetickými úchytkami do stredovej polohy, recoatovací materiál bol v malej vrstve na vlákno nanosený pomocou tenkého štetca a následne bol materiál zatvrdnutý pomocou spomínaných UV LED. Kvalita výslednej ochrany je však v tomto prípade diskutabilná. Ochrana na vlákne síce nanosená a zatvrdnutá bola, na vlákne sa však nachádzali hrbolčeky. Najväčším problémom je zchádzanie materiálu z vlákna. To je spôsobené tým, že vlákno je len voľne položené, nemá žiadnu podporu z vrchu ani spodu, kde by mohol materiál rovnomerne obalovať zvarené vlákno. Takto sa

na vlákne spraví niekde hrubšia a inde zase tenšia ochrana. V prípade pokračovania práce, by bolo vhodné vaničku opatriť o vrchnú, zaklápacia časť a pridať prípadne silikónové pláty s výrezom, kde by bolo vlákno permanetne zabezpečené a materiál by obaľoval celé vlákno rovnomerne. Vhodnou a lepšou alternatívou k vaničke by mohol byť krokový motor s automatizovaným náterom, výklenkom priamo v držiaku a taktiež zabudovanými UV LED diodami. Ďalším vhodným nápadom by mohlo byť vytvorenie tlačiarne podobnej tej na tlačenie papiera, kde by namiesto papiera bolo vložené vlákno, a náplň do tlačiarne by v tomto prípade zohral rolu recoatovací materiál.

7 Návrh laboratórnej úlohy

Laboratórna úloha vychádza z merania útlmu spoja zvarného a spoja konektorového - viacnásobne rozpojenie a opätovné spojenie či zvarenie optického spoja, ktoré je popísané v kapitole 4. Tabuľky sú v prípade protokolu a meraní v bakalárskej práci rovnaké, grafy sú spojené do troch – t.z. jeden konektor, dve vlnové dĺžky, jeden graf. V protokole je najprv popísané zadanie, aby mal študent predstavu o tom, čo bude robiť a s čím bude pracovať, následne vysvetlená v teoretickom úvode problematika samotných spojov, potom popísaný postup merania a v závere je na študenta cielených pár otázok. Súčasťou protokolu sú aj predpripravené tabuľky a grafy, aby mohol študent priamo vpisovať potrebné údaje a ušetril čas robením vlastných tabuliek či grafov. Do grafov následne študent len zaznačí údaje z tabuľky a ukáže profesorovi výslednú závislosť. Študent do sekcie použité prístroje napíše tie s ktorými pracoval a v závere odpovie na pár jednoduchých otázok aby bolo možné vidieť že študent problematike porozumel. Návrh protokolu s predpripravenými tabuľkami a grafmi je súčasťou kapitoly. Vypracovaný protokol je súčasťou prílohy B. Použité údaje vychádzajú z merania v kapitole 4. Úroveň výkonu v dBm bola pre lepšiu prehľadnosť prepočítaná na dB podľa vzorca 3.2

Lab.č.1 Meranie útlmu optických spojov

Zadanie

1. Zoznámte sa s obsluhou zväračky FITEL S122 a zalaminovačky. Prehliadnite si pripravené vlákna a konektorové spojky.
2. Pripravené vlákna očistite, zalomte a následne zvaríte v zväračke optických vlákien.
3. Zoznámte sa s obsluhou meracej sústavy pre priamu metódu merania útlmu - merač zmeny výkonu FOPM-102 a zdroj žiarenia FOLS-101. Zmerajte útlm zvareného vlákna pre dve vlnové dĺžky a vlákno 10x zalomte a opäť zvaríte. Následne opäť premerajte útlm vlákna.
4. Pripravené pigtaily s konektormi FC/APC, E2000 a LC/PC spojte pomocou pripravených konektorových spojok a 20x rozpojte. Premerajte útlm jednotlivých optických konektorových spojov.
5. Výsledky útlmu zvareného spoja a konektorových spojov porovnajte, zapíšte do tabuľky a zostavte do prehľadnej správy o meraní.

Teoretický rozbor

Optické vlákno je valcový dialektický vlnovod, najčastejšie sklenený. Základným materiálom pre jeho výrobu je oxid kremičitý kvôli nízkemu útlmu. K nemu sa ešte pridávajú tzv. legovacie prímеси ako je napríklad bór, germánium a fluór. Skláda sa z **jadra**, cez ktoré sa prenášajú elektromagnetické vlny a **skleneného plášťa**, v ktorom nastáva odraz svetla. Pre zaistenie určitej pevnosti a ochrany sa používa primárna ochrana.

Optické vlákna rozdeľujeme podľa niekoľkých kritérií, ako sú materiál použitý na výrobu – napr. sklo alebo plast, ale aj podľa konštrukcie – **jednovidové**, **mnohovidové** a **gradientné**, ktoré sa od seba odlišujú prenosovými parametrami ale hlavne počtom vidov.

Vzhľadom na rôznu dĺžku a rôznorodosť optických vlákien čo sa týka druhov a parametrov, je nutné vlákna vzájomne spájať. Poznáme **pevný spoj** a **rozoberateľný spoj**. K pevným spojom radíme **zváranie optických vlákien**, zlepované spoje a spoje mechanické. K rozoberateľným spojov patria **konektorové spoje**.

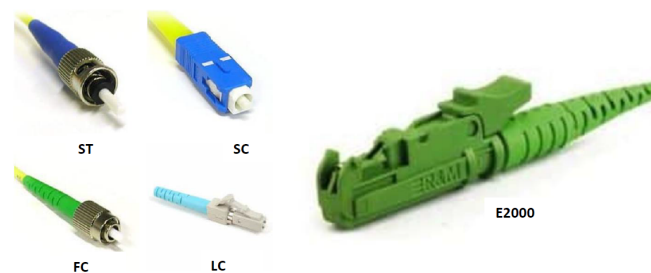
Zváranie optických vlákien je jednou z najpoužívanejších metód spojovania optických vlákien. Najčastejšie sa dnes využíva metóda zvárania elektrickým oblúkom. Jedná sa o najkvalitnejší typ spojovania. Zvar vzniká pri teplote 1800 – 2000 °C. Pre laboratórne účely je k dispozícii zväračka optických vlákien FITEL S122. Pre účely zvárania je k dispozícii jednovidové vlákno o dĺžke 1 m s pigtailom SC/APC pre následné meranie útlmu priamou metódou. Zväračka je vhodná pre zváranie bežných jednovidových a viacvidových vlákien o priemere 125 μm. Zväračka sa vyznačuje nízkym útlmom výsledných zvarov vďaka systému zarovnávanania vlákien PAS. Pozorovanie vlákien prebieha pomocou CCD kamery. Obraz z tejto kamery sa zobrazuje na LCD monitore a z následného streamu sa vyhodnocuje polohovanie, posúdenie koncových plôch a stanoví sa L-PAS útlm.

V prípade **konektorového spojenia** sa jedna o druhé najkvalitnejšie spojovanie optických vlákien. Existuje niekoľko druhov konektorov, ktoré majú rozdielne využitie a rôzne parametre. Niektoré sú vhodnejšie do náročnejších prostredí, iné zase vysoké teploty či záťaž tak dobre nezvládajú. Hlavným rozdielom medzi jednotlivými konektormi je typ a **úprava čela ferule**. Ferula je vnútorný valcovitý diel konektoru a jej úlohou je udržiavať optické vlákno presne vo svojej osi a nemennej axiálnej pozícii.

Typy ferulí:

- Aluminiová ferula – Veľmi krehký materiál a obtiažné leštenie, veľká tepelná rozťažnosť.
- Zirkóniová ferula – Najčastejšie používaný typ ferule, veľmi dobré leštenie, má 4x väčšiu pevnosť ako hliník, opotrebovanie oterom je minimálne.
- Plastová ferula – Najlacnejší typ, ľahké leštenie alebo väčší útlm, malé straty vložného útlmu vďaka malému opotrebovaniu oterom, malá životnosť.
- Kompozitná ferula - Najpresnejšia ale najdrhašia, malé straty vložného útlmu
- ARCAP ferula – Lacná, ľahké leštenie, vysoká životnosť

Najbežnejším a najpoužívanejším v oblasti telekomunikácií je konektor SC/APC. **APC** označenie znamená uhlové sférické zabrúsenie, ktoré sa využíva pri jednovidových vláknach a poskytuje ešte menšie straty než zabrúsenie typu PC. Vložný útlm je približne 0,1 — 0,3 dB a útlm odrazu činí -65 dB. Čelná plocha ferule APC je zbrúsená v uhle cca. 8 stupňov čím sa eliminuje odraz signálu. Na obr. 1 si môžete prezrieť najbežnejšie typy konektorov.



Obr. 1: Rôzne typy konektorov

Jednotlivé **farebné označenie konektorov** závisí na type zabrúsenia ferule a typu vlákna. V prípade jednovidových vlákien s APC zabrúsením ide o zelený typ konektora, v prípade jednovidových vlákien, ktoré majú PC zabrúsenie sa jedná konektor modrý. V prípade viacvidových vlákien farba konektora závisí na priemere plášťa a priemere jadra.

Samotné **spojovanie optických konektorov** prebieha za pomoci optických spojok. Každý typ konektora má vlastný typ spojky. Je možné spojiť dva rôzne typy konektorov, nie však s rozdielnym zabrúsením ferule! Konektorové spojky majú výhodu v ich možnom viacnásobnom rozpojení a následnom spojení, čo je vhodné v prípade chyby konektora, zalomenia vlákna, či nutnosti konektor vymeniť za iný typ. V tomto prípade je nutné

dbať na čistotu prostredia, samotnej spojky a hlavne ferule konektora, ktorú je nutné vždy poriadne očistiť.

Spojovanie optických vlákien, či už zvarom, alebo pomocou konektorov so sebou, okrem pozitív, prináša aj viacero nevýhod. Samotné vlákno sa vyznačuje určitými stratami a následné zváranie či spojenie dvoch vlákien konektorom tieto straty navyšujú. Z tohto dôvodu je nutné spojené optické vlákno premerať a overiť tak kvalitu spoja. Najdôležitejšími parametrami, ktorými sa zisťuje kvalita optického spoja patrí **útlm** a **útlm odrazu**. Útlm je základným a najdôležitejším prenosovým parametrom a je celkovým merítkom strát optického výkonu pri šírení optického signálu vláknom. Podľa neho vieme určiť nie len kvalitu samotného vlákna, ale taktiež celkovú kvalitu optickej trasy spojovaní. Útlm odrazu predstavuje celkové nahromadené svetlo odrazené späť do zdroja pozdĺž telekomunikačného spojenia. Odraz žiarenia nastáva na rozhraní dvoch materiálov s rôznym indexom lomu. Podľa normy ČSN EN 61300-3-4 sú najvhodnejšími metódami pre **meranie útlmu** pri optických spojoch, ktoré vznikli zvarom alebo spojovaním pomocou konektorov, metóda dvoch dĺžok, metóda vložných strát (vložného útlmu) a metóda spätného rozptylu (OTDR).

V prípade tejto laboratórnej úlohy je použitá **metóda vložných strát**. Táto metóda je vhodná pre meranie útlmu hlavne pri spojoch opatrených konektormi. Jedná sa o metódu nedeštruktívnu, ale menej presnú než metóda dvoch dĺžok. Pred samotným meraním je nutné meraciu súpravu nakalibrovať pomocou referenčného vlákna priamym prepojením zdroja žiarenia s detektorom, čím dostaneme výkon P_0 . Následne namiesto referenčného vlákna do meracej sústavy zapojíme požadované optické vlákno, opatrené konektormi či zvarom. Na tomto vlákne sa namerá výkon P_1 . Výsledný útlm vypočítame pomocou vzorca:

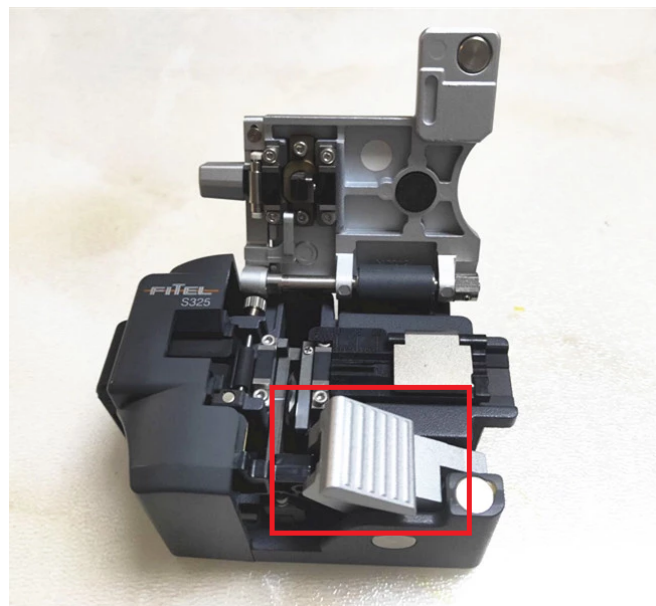
$$A = P_0 - P_1 \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Dnes sa už využívajú prístroje, ktoré útlm na optickom spoji pri použití tejto metódy vypočítajú automaticky. V tomto prípade sa útlm zobrazí na displeji meracej aparatúry a odpadá nutnosť manuálneho výpočtu útlmu.

Postup merania

Príprava vlákna

1. Ako prvé odstráňte z vlákna primárnu a sekundárnu ochranu za pomoci priložených klieští vo vzdialenosti približne 0,5 cm od konca vlákna.
2. Na vlákno nastrčte priloženú tepelne zmršiteľnú bužirku, ktorá ochráni výsledný zvar.
3. Takto oholené vlákno očistíte pomocou Isopropylalkoholu a suchými vreckovkami tak, že na vreckovku nanesiete Isopropylalkohol a vlákno jemne do vreckovky chytíte a očistíte.
4. Očistené vlákno vložte do zalamovačky vlákien a vlákno zalomte.
5. Vlákno je nutné do zalamovačky zasunúť do požadovaného otvoru a držiak na vlákno zaklapnúť. Následne zaklapnite príklop zalamovačky a stlačte páčku v prednej časti zalamovačky, viď. obr. 2.



Obr. 2: Zalamovačka vlákien FIBEL S325

Tento postup zopakujte aj pre druhú stranu vlákna!

Zváranie

6. Vlákna založte do priložených držiakov a presuňte do zväračky optických vlákien. Uistite sa že vlákna sú v držiakoch správne osadené aby nedošlo k nekvalitnému zvaru!
7. Po kontrole uloženia vlákien a osadenia držiakov v zväračke priklopte viečko zväračky.
8. Na displeji zväračky by ste mali vidieť nápis **Pripravené**. Skontrolujte že sú vlákna v poriadku a nepresahujú stredovú čiaru! Následne môžete zváranie spustiť tlačidlom ►.
9. Zväračka prevedie všetky úkony automaticky. Na displeji zväračky je možné vidieť priebeh zvaru a následný útlm vyhodnotený zväračkou.
10. Po úspešnom ukončení zvaru je nutné zataviť bužírku na vlákno. Nadvihnite opatrne zvarené vlákno z držiakov a položte ho do pecky umiestnenej na vrchu zväračky. Pecku zaklapnite. Proces prebehne automaticky.

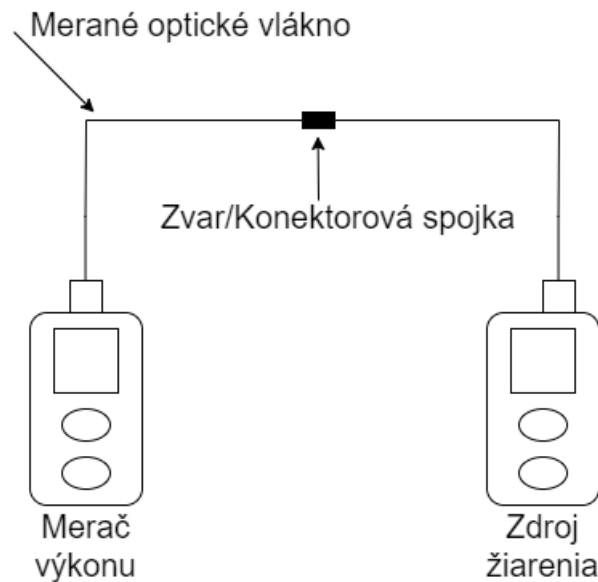


Obr. 3: Zväračka vlákien FITEL S122

Meranie útlmu

Pre meranie útlmu bude použitá meracia súprava pre meranie priamou metódou. Meranie bude uskutočnené pre dve vlnové dĺžky - 1310 nm a 1550 nm. Schéma zapojenia je na obr. 4.

Je nutné dbať na čistotu konektorov!



Obr. 4: Schéma zapojenia meracej sústavy

11. Najprv meraciu sústavu skalibrujte pomocou referenčného vlákna.
12. Zapojte meraciu sústavu podľa obr. 4 a zmerajte útlm zvareného optického spoja pre jednu aj druhú vlnovú dĺžku.
13. Vlákno s pigtailom zalomte vo vzdialenosti približne 5cm od zvareného miesta, vlákno opäť zvaríte a premerajte opäť útlm. Takto postupujte minimálne 10x - na jednu aj druhú stranu od miesta prvého zvaru.
14. Porovnajte útlm udávaný zväračkou a priamou metódou, hodnoty zapíšte do priložených tabuliek a závislosť vyneste do grafu.
15. Pripravte si konektorové spojky a vlákna pomocou nich spojíte, následne premerajte útlm trasy priamou metódou.
16. Máte k dispozícii tri konektorové spojky, každú z nich 20x rozpojte (v prípade konektora LC/APC je vhodné spraviť 30 meraní) a následne zmerajte útlm danej trasy, hodnoty zapíšte do priložených tabuliek. Jednotlivé závislosti vyneste do grafov – pre každý konektor obidve vlnové dĺžky do jedného
17. Porovnajte hodnoty opticky zvarených spojov a spojov, ktoré vznikli pomocou konektorov pre obidve vlnové dĺžky.

Záver

Porovnajte jednotlivé hodnoty útlmu opticky zvarného spoja a optického spoja, ktorý vznikol spojením dvoch konektorov. V čom sa tieto hodnoty líšia? Pre ktorú vlnovú dĺžku boli zistené hodnoty útlmu lepšie? Ktorý z použitých konektorov je najmenej náchylný na viacnásobné rozpojovanie? Mení sa hodnota útlmu opticky zvarného spoja pri viacnásobnom zlomení a opätovnom zvarení? Ktorý spôsob spojovania optických vlákien je viac vhodný a prečo? Spracujte prehľadnú správu o meraní a v závere odpovedzte na jednotlivé otázky.

Ústav telekomunikácií FEKT VUT v Brne			Meno		ID
			Ročník	Obor	Skupina
Spolupracoval	Merané dňa	Odovdzané dňa		Hodnotenie	
Názov úlohy Meranie útlmu optických spojov					Č. úlohy 1

Namerané hodnoty

Namerané hodnoty útlmu pre zvarený optický spoj – 1310 nm

Tabuľka 1: Vyhodnotenie strát pri zváraní optických vlákien

Zvar č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zalomenie L [°]										
Zalomenie R [°]										
Útlm na zvare [dB]										
Celkový útlm trasy [dB]										

Namerané hodnoty útlmu pre konektorový spoj – 1310 nm

Tabuľka 2: Konektor FC/APC

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]										
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]										
Počet rozpojení	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Útlm [dB]										

Tabuľka 3: Konektor LC/PC

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]										
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]										

Tabuľka 4: Konektor E2000

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]										
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]										

Namerané hodnoty útlmu pre konektorový spoj – 1550 nm

Tabuľka 5: Konektor FC/APC

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]										
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]										
Počet rozpojení	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Útlm [dB]										

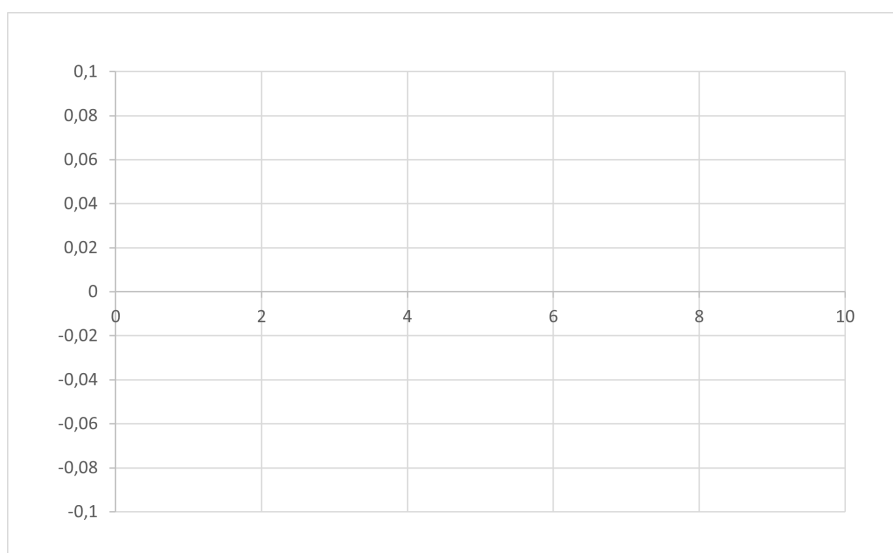
Tabuľka 6: Konektor LC/PC

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]										
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]										

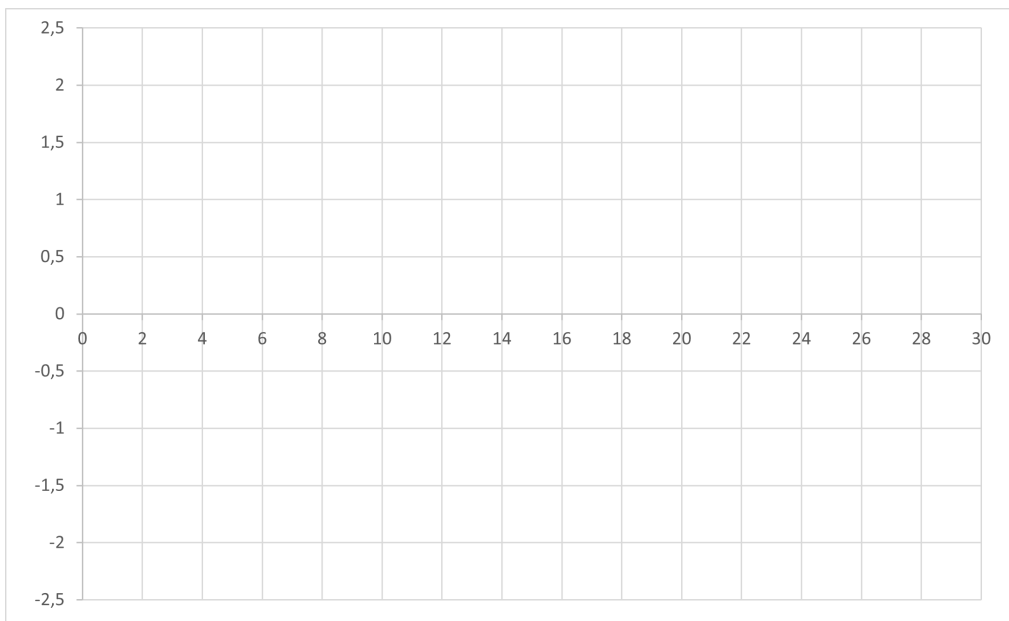
Tabuľka 7: Konektor E2000

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]										
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]										

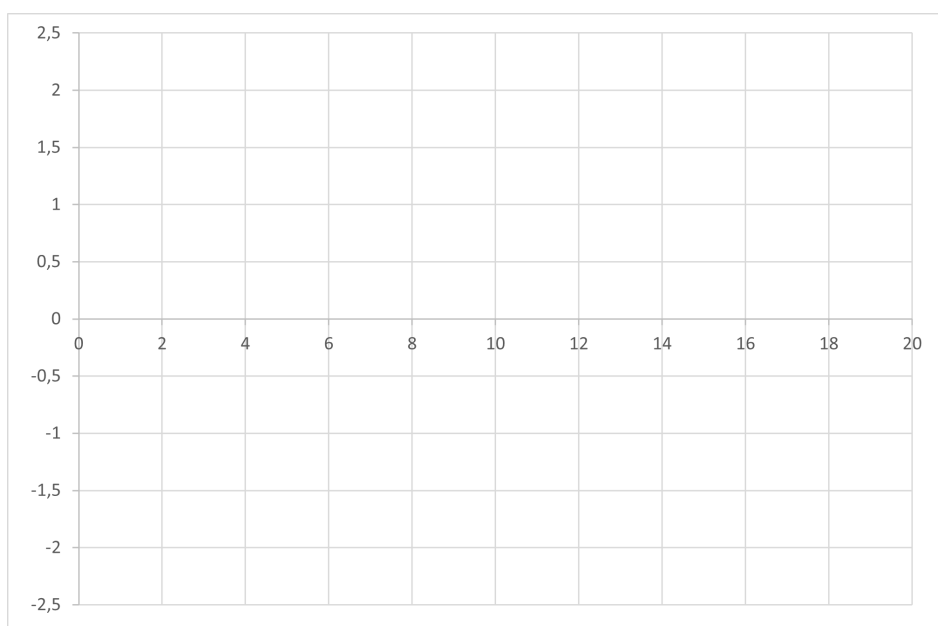
Grafy



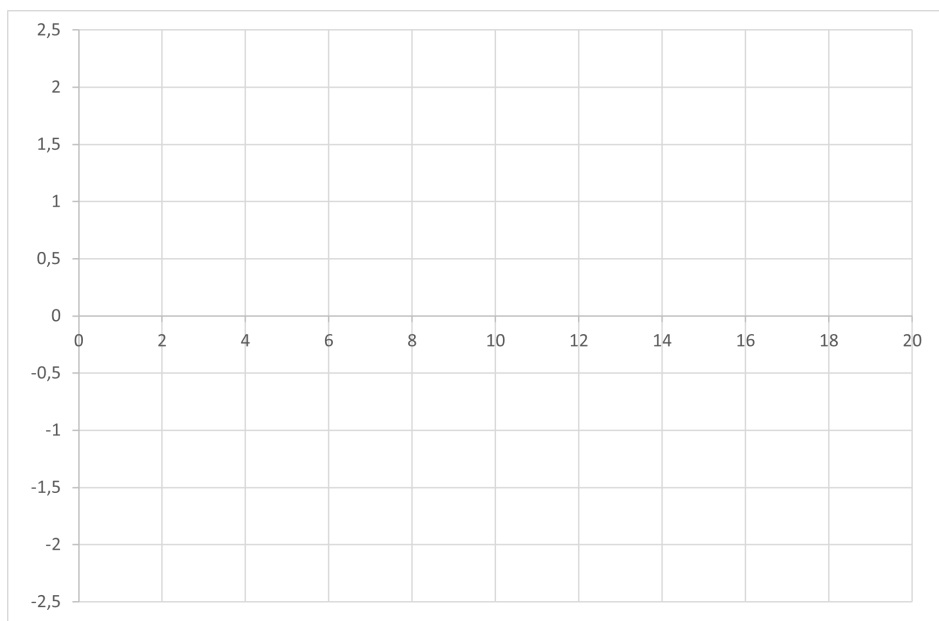
Graf č.1 Závislosť útlmu na počte rozpojení opticky zvarého spoja



Graf č.2 Závislost útlmu na počte rozpojení konektorového spoja - FC/APC



Graf č.3 Závislost útlmu na počte rozpojení konektorového spoja - LC/APC



Graf č.4 Závislost útlmu na počte rozpojení konektorového spoja - E2000

Použité přístroje

Záver

Záver

Optické vlákna sú jedným z najviac využívaných prenosových médií v dnešnej dobe. Je to vďaka ich výborným prenosovým vlastnostiam na dlhé trasy a taktiež sú odolné voči vonkajším vplyvom.

Bakalárska práca sa v teoretickej časti venovala rozboru jednotlivých typov optických vlákien a ich základných parametrov. Dôležitou súčasťou každej optickej trasy je spojovanie optických vlákien. Z tohto dôvodu je v práci riešená aj problematika a techniky spojovania optických vlákien. Práca sa venuje opticky zvarovým spojom, mechanickým spojom a v neposlednom rade konektorovým spojom. Dôležitou súčasťou sú prenosové parametre ako sú útlm či útlm odrazu a mechanická odolnosť. Teoretická časť sa venovala možnostiam merania útlmu a útlmu odrazu optického spoja. Popísaný bol a aj proces obnovy primárnej ochrany a ochrana optických spojov.

Praktická časť vychádzala z teoretických znalostí a je založená na porovnaní útlmu optických spojov, ktoré vznikli zvarom a spojov konektorových. Cieľom bolo zistiť, aký je rozdiel v jednotlivých typoch spojení a či sa teoretické znalosti zhodujú s tými z praxe. V prípade optických zvarového spoja, bol nameraný útlm v jednotkách dB. V prípade konektorových spojov, bola nameraná úroveň výkonu v dBm, pri viacnásobnom rozpojovaní a opätovnom spojovaní. V prípade zvarového spoja, bol útlm meraný na vlnovej dĺžke 1310 nm, pri konektorovom spojení sa jednalo o vlnové dĺžky 1310 nm a 1550 nm a použité boli tri typy konektorov. Všetky merania prebehli meraním metódou vložných strát. Z nameraných hodnôt je možné určiť, že opticky zvarovaný spoj je stále jeden z najkvalitnejších spôsobov spojovania optických vlákien, útlm činil v priemere -0,2 dB. Konektorové spoje sú jednoduchšie na manipuláciu, na spojenie je nutná spojka, nevýhodou je však vyšší útlm pri niektorých typoch konektorov, a taktiež zmeny útlmu pri ich viacnásobnom rozpojovaní a spojovaní. V prípade konektorov, bola otestovaná aj ich mechanická odolnosť, čím sme overili, že konektor LC/PC je vhodným do prostredí, kde sú optické spoje častokrát zaťažované. Aj napriek zabrúseniu ferule APC pri konektore FC, boli skoky výkonu pri rozpojovaní výrazné. V neposlednom rade bolo otestované spojovanie optických vlákien pomocou mechanických spojok.

Práca sa následne venovala návrhu minimalizácie opticky zvarového spoja. Popísaných bolo niekoľko možných metód realizácie minimalizovaného spoja a odskúšaný bol návrh s držiakmi vlákien. Zvar prebehol v poriadku, držiaky by však potrebovali zmeny. Popísaný bol možný návrh obnovy primárnej ochrany, následne bol v minimalizovanej verzii návrh odskúšaný. Výsledná ochrana kvalitou neodpovedala kvalite akú ponúka samotný recoater, zlepšenie návrhu by však bolo predmetom ďalšieho spracovania.

Literatúra

- [1] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. 2. vyd. , 2017. 441 s. ISBN 978-80-86785-14-1
- [2] ANDREW, Dr.;YABLON, D *Optical Fiber Fusion Splicing*, 2005. 314 s. ISBN 9783540231042.
- [3] MURATA, H. *Handbook of optical fibers and cables. 2nd ed.* New York. 1996. 525 s. ISBN 0824797191.
- [4] IT POMOC. *Štruktúra optického vlákna*,[online]. Bratislava: IT POMOC, 2021 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <<https://zvaranie-optiky.sk/opticke-vlakna-kable/preco-opticke-vlakno/>>
- [5] *Single Mode vs. Multimode Fiber Optic Cables*. [online]. Cleerline Technology Group [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <<https://cleerlinefiber.com/2019/03/19/singlemode-vs-multimode-fiber-optic-cables/>>
- [6] KUCHARSKI, M.; DUBSKÝ, P. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*, Praha: Mikrokom, 1998, 141 s
- [7] The Fiber Optic Association, Inc. *Mechanical Splices*. [online]. Dostupné z:<<https://www.thefoa.org/tech/ref/termination/mechsplice.html>>.
- [8] OFA, s.r.o *Produktový katalog - Mechanické spoje vláken Fibrlok II 2529*. [online]. [cit. 2021-10-12]. Dostupné z:<https://www.ofacom.cz/catalogs/113_1_2_07-m-03-fibrlok-2529.pdf>.
- [9] DIPOL,sp.j. *Optický mechanický spoj: ULTIMODE FAST-MS1* [online]. Dostupné z: <https://www.dipolnet.cz/opticky_mechanicky_spoj_ultimode_fast-ms1_L5550.htm>.
- [10] ŠKARUPA,T. *Optické komunikace II - Optické konektory*. [online]. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014.28 s. Dostupné z: <<https://docplayer.cz/11639987-Opticke-komunikace-ii-opticke-konektory.html>>.
- [11] MARŠÁLEK,L. *Optická vlákna* [online]. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. 172 s. Dostupné z:"<https://docplayer.cz/333859-Opticka-vlakna-v-sb-technicka-univerzita-ostrava-fakulta-elektrotechniky-a-informatiky-katedra-elektroniky-a-sdelovaci-techniky.html>".
- [12] Newport *Fiber Optics*. [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/h3e/h84/8797095985182/Fiber-Preparation-Fiber-Connectors.pdf>.

- [13] THORLABS, Inc. *Fiber Recoaters* [online]. [cit. 2021-10-20] Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2430>.
- [14] OFS. *Fiber Coatings, Buffering and Cabling Materials*, [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <<https://www.ofsoptics.com/optical-fiber-coatings/>>
- [15] LANCOMAT s.r.o. *Kazety a ochrany optických svárů*, [online]. Praha 9 : LANCOMAT s.r.o., 2021 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <<https://www.lancomat.cz/kazety-a-ochrany-optickyh-svaru-c261/>>
- [16] PROCHÁZKA, J. *Měření na optickém vlákně* [online]. Brno. 2014 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <<http://hdl.handle.net/11012/34278>>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Miloslav Filka.
- [17] The Fiber Optic Association, Inc. *Measuring Reflectance or Return Loss* [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <<https://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/reflectance.html>>.
- [18] 3SAE Technologies, Incorporated. *Fitel S122 Fusion Splicer*, [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <<http://www.3sae.com/products/fitel-s122-fusion-splicer.php>>
- [19] Electrical Technology. *How to Calculate the Value of Resistor for LED's and Different Types of LED Circuits*. [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <<https://www.electricaltechnology.org/2013/08/how-to-calculate-value-of-resistor-for-led-circuits.html>>

Zoznam symbolov a skratiek

<i>dB</i>	jednotka útlmu – Decibel
<i>dBm</i>	jednotka absolútnej úrovne výkonu – DecibelMilliwatts
MM	viacvidové vlákna – Multimode
LED	elektroluminiscenčná dióda – Light-Emitting Diode
LID	Local Injection and Detection
L-PAS	Lens Profile Alignment System
OTDR	metóda spätného rozptylu – Optical Time Domain Reflectometry
PVC	umelo vyrobený plastický polymér – Polyvinylchlorid
SM	jednovidové vlákna – Singlemode
UV	ultrafialové svetlo – Ultraviolet

A Zmeny hodnôt výkonu pre optické vlákno s konektorom FC/APC

Tab. A.1: Zmeny hodnôt výkonu pre optické vlákno s konektorom FC/APC

Počet rozpojení	Zmena výkonu pri 1310 nm [dBm]	Zmena výkonu pri 1550 nm [dBm]
1	-11,67	-12,07
2	-12,19	-11,49
3	-11,40	-10,29
4	-13,90	-12,05
5	-11,06	-11,40
6	-11,28	-10,57
7	-13,46	-12,49
8	-14,10	-13,58
9	-11,40	-10,25
10	-11,23	-12,28
11	-11,11	-12,17
12	-11,13	-12,07
13	-11,15	-11,97
14	-11,85	-12,28
15	-11,09	-11,22
16	-11,66	-14,84
17	-11,05	-11,12
18	-12,65	-14,55
19	-11,13	-11,61
20	-11,08	-11,37
21	-12,17	-14,21
22	-11,91	-11,46
23	-12,06	-12,33
24	-11,83	-13,23
25	-12,87	-16,92
26	-11,16	-11,30
27	-11,01	-11,03
28	-11,85	-13,43
29	-11,04	-12,00
30	-11,11	-11,97

Počet rozpojení	Zmena výkonu pri 1310 nm [dBm]	Zmena výkonu pri 1550 nm [dBm]
31	-11,85	-12,77
32	-11,13	-12,41
33	-11,25	-12,07
34	-11,10	-12,13
35	-10,90	-10,90
36	-11,01	-12,10
37	-10,89	-10,98
38	-11,12	-11,90
39	-11,05	-11,45
40	-11,45	-11,74
41	-10,93	-11,25
42	-11,05	-11,57
43	-11,29	-11,79
44	-10,89	-11,12
45	-11,21	-12,83
46	-11,59	-12,49
47	-11,64	-13,22
48	-10,49	-12,10
49	-10,97	-10,95
50	-11,06	-11,20
51	-11,90	-12,04
52	-11,12	-11,28
53	-11,07	-10,99
54	-11,12	-10,97
55	-11,00	-12,20
56	-11,25	-11,35
57	-11,46	-11,20
58	-11,36	-11,09
59	-11,13	-11,25
60	-13,11	-22,90
61	-11,11	-12,64
62	-11,14	-10,94
63	-11,44	-11,81
64	-11,85	-12,56
65	-12,14	-13,22

B Laboratórna úloha

Ústav telekomunikácií FEKT VUT v Brne			Meno Dominik Galovič		ID 220888
			Ročník 3.	Obor BPC-TLI	Skupina 02
Spolupracoval	Merané dňa 20.5.2022	Odovdzané dňa 27.5.2022	Hodnotenie		
Názov úlohy Meranie útlmu optických spojov					Č. úlohy 1

Namerané hodnoty

Namerané hodnoty útlmu pre zvarený optický spoj – 1310 nm

Tabuľka 1: Vyhodnotenie strát pri zváraní optických vlákien

Zvar č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zalomenie L [°]	1,14	0,14	0,88	1,15	1,25	0,85	1,54	0,70	0,61	2,12
Zalomenie R [°]	2,51	0,21	0,68	0,63	0,14	1,30	1,1	1,37	1,17	1,18
Útlm na zvare [dB]	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Celkový útlm trasy [dB]	0,01	-0,03	-0,08	-0,01	-0,03	-0,02	-0,02	0,03	-0,04	0,02

Namerané hodnoty útlmu pre konektorový spoj – 1310 nm

Tabuľka 2: Konektor FC/APC

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]	0,52	-0,27	2,23	-0,61	-0,39	1,79	2,43	-0,27	-0,44	-0,56
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]	-0,54	-0,52	0,18	-0,58	-0,01	-0,62	0,98	-0,54	-0,59	0,5
Počet rozpojení	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Útlm [dB]	0,24	0,39	0,16	1,2	-0,51	-0,66	0,18	-0,63	-0,56	0,18

Tabuľka 3: Konektor LC/PC

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	0,05
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]	0	0,03	0	0,01	0	0,04	0,04	0	0,03	0,03

Tabuľka 4: Konektor E2000

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]	0	-0,25	-0,24	-0,23	-0,15	-0,25	0,03	0,5	0,82	-0,02
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]	0,04	-0,01	-0,01	0,02	-0,01	-0,11	-0,13	0	-0,13	-0,03

Namerané hodnoty útlmu pre konektorový spoj – 1550 nm

Tabuľka 5: Konektor FC/APC

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]	-0,58	-1,78	-0,02	-0,67	-1,5	0,42	1,51	-1,82	0,21	0,22
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]	0,1	0	-0,1	0,21	-0,85	2,77	-0,95	2,48	-0,46	-0,7
Počet rozpojení	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Útlm [dB]	2,14	-0,61	0,26	1,16	4,85	-0,77	-1,04	1,36	-0,07	-0,1

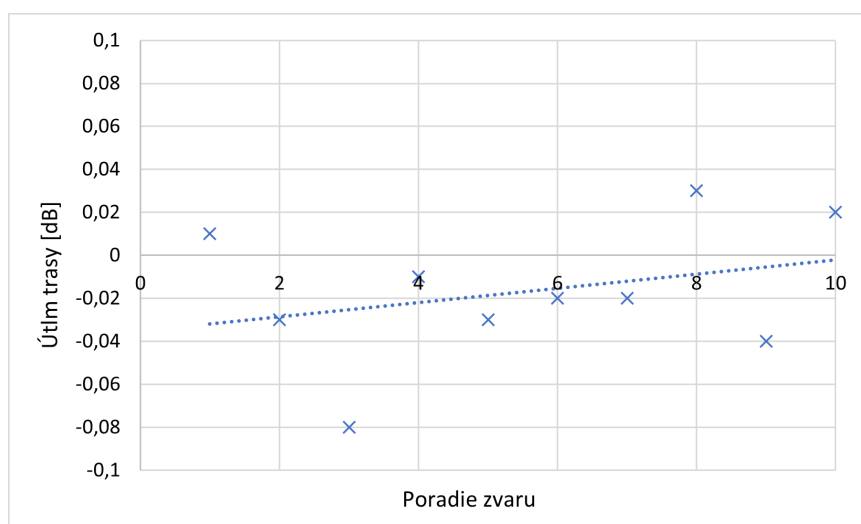
Tabuľka 6: Konektor LC/PC

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]	0	-0,01	0	0,03	0	0,02	-0,01	0	0	0,02
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]	0,04	0,01	0	0	-0,01	0,03	0	0	-0,01	0,01

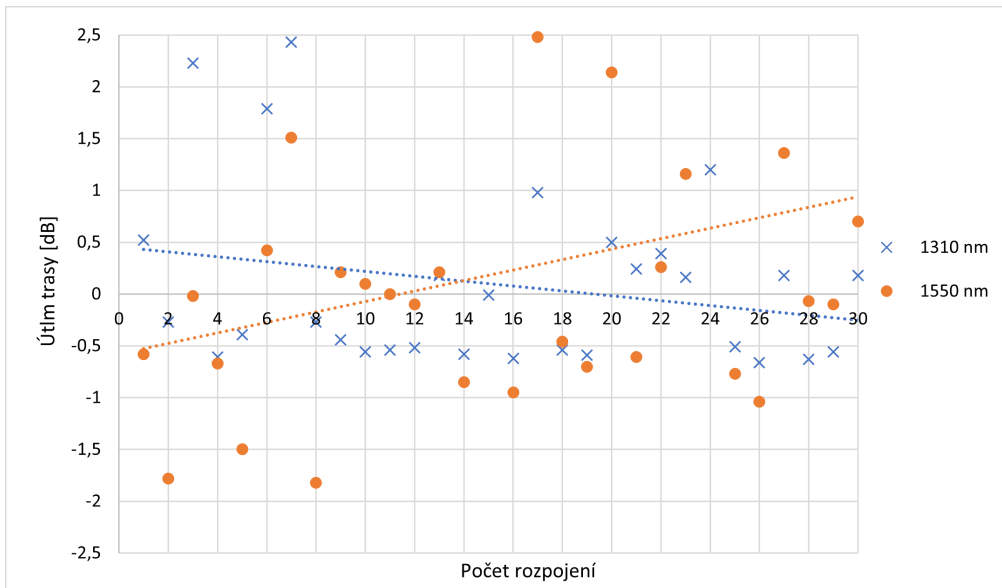
Tabuľka 7: Konektor E2000

Počet rozpojení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Útlm [dB]	-0,13	-0,2	-0,2	-0,13	-0,06	0,03	0,48	0,52	0,03	0
Počet rozpojení	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Útlm [dB]	0	-0,02	0,03	0	-0,1	-0,08	0	-0,04	0	0,03

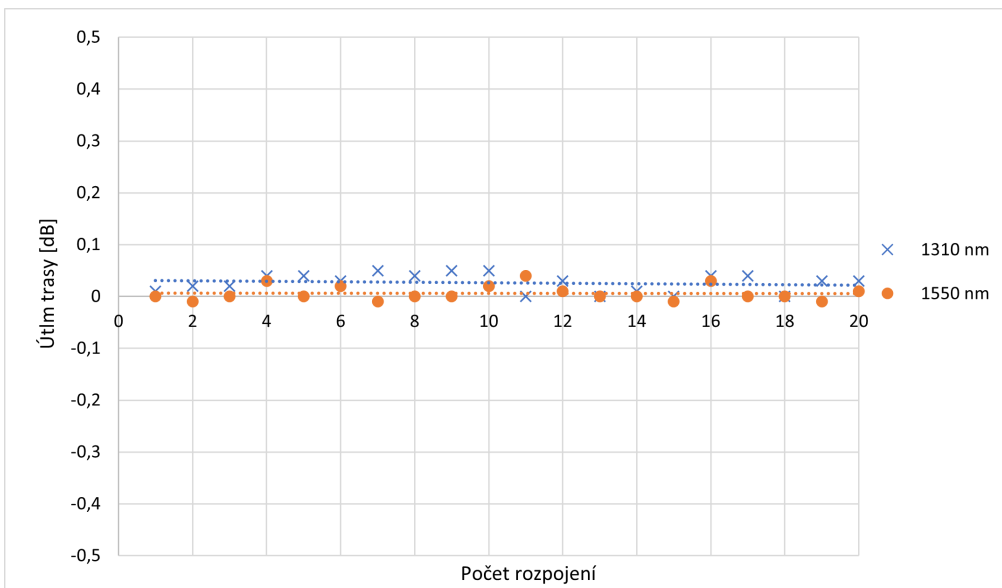
Grafy



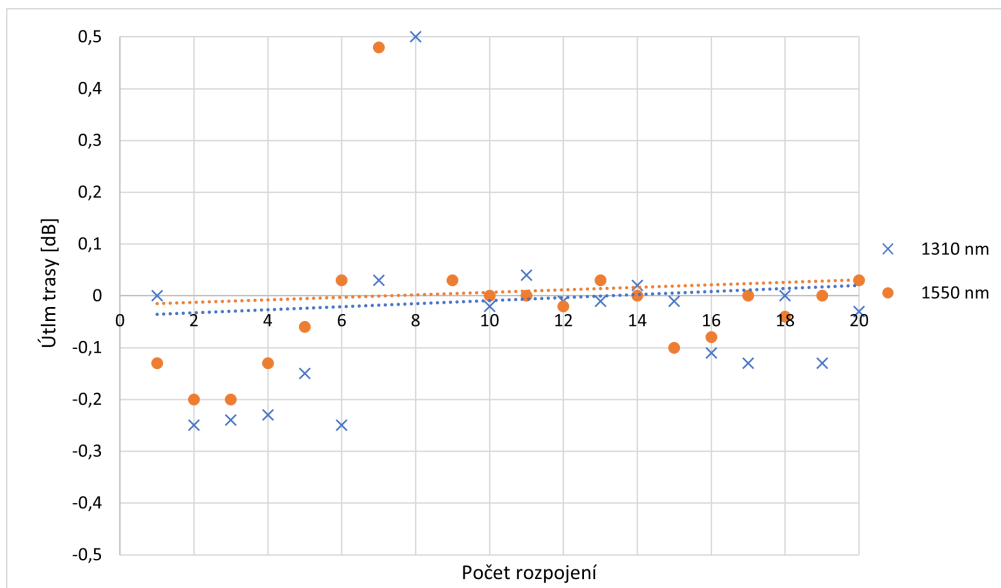
Graf č.1 Závislosť útlmu trasy na počte rozlomení a opätovnom zvarení vlákna



Graf č.2 Závislost' útlmu na počtu rozpojení konektorového spoja - FC/APC



Graf č.3 Závislost' útlmu na počtu rozpojení konektorového spoja - LC/APC



Graf č.4 Závislosť útlmu na počte rozpojení konektorového spoja - E2000

Použité prístroje

Zváračka optických vlákien FITEL S122

Zalamovačka optických vlákien FITEL S325

Merač zmeny výkonu a útlmu FOPM-102

Zdroj žiarenia FOLS-101

Záver

V tejto laboratórnej úlohe sme sa naučili ako zvärať optické vlákna a osvojili sme si niektoré typy optických konektorov. Ako prvé sme vlákna oholili zdrhovačkou na vlákna a očistili liehom. Následne sme vlákna zalomili v zalamovačke a zvarili. Výsledky sme prehľadne zapísali do tabuľky a závislosť útlmu na počete zvarov sme vyniesli do grafu. Z tabuľky je možné vidieť, že útlm, ktorý vyhodnotila zväračka sa pohyboval približne v rovnakých hodnotách. V prípade zvaru č.3 bol nameraný najväčší útlm zvaru a aj celkovej optickej trasy. To mohlo byť najpravdepodobnejšie spôsobené zlým zalomením, prípadne očistením vlákna. Aj napriek tomuto skoku útlmu, je však celkový útlm viac-menej stabilný. V prípade konektorových spojení, najlepšie výsledky dokazoval konektor LC/PC. Najhoršie obstál konektor FC/APC, kde boli skoky útlmu pri viacnásobnom rozpojovaní veľmi výrazné. Ak by sa mali namerané hodnoty porovnať s teoretickými poznatkami, výsledky sú prekvapujúce len v prípade konektora FC s ferulou APC. APC ferula by mala poskytovať menšie straty a väčšiu odolnosť voči rozpojovaniu. Dôvodom mohla byť zle skalibrovaná meracia sústava, poprípadne znečistené čelá jednotlivých konektorov, či poškodený samotný konektor alebo spojka. Naopak je známe, že konektor LC sa hodí práve do prostredí, kde sú optické spoje vysoko zaťažené. Pri porovnaní samotných techník, je zrejmé že zvar poskytuje najmenší útlm. V prípade mechanickej náročnosti, je lepšou variantou.