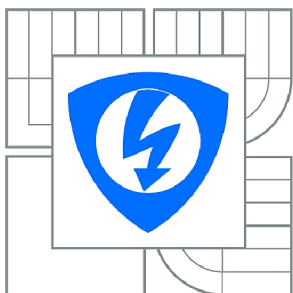




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE S POF - POLYMEROVÁ OPTICKÁ VLÁKNA

EXPERIMENTAL WORK WITH POF - POLYMER OPTICAL FIBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ DOLEŽAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Ondřej Doležal

ID: 134473

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální práce s POF - polymerová optická vlákna

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem práce je seznámení se s POF vlákny, s jejich vlastnostmi a s možnostmi jejich využití v průmyslových sítích, automobilovém a leteckém průmyslu a v přístupových sítích. Navrhněte metodiku práce s POF vlákny, včetně měření jejich parametrů. Provedte návrh spoje s vlákny POF. Provedte měření teplotní závislosti spoje a testujte dosah spoje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. CENTA, Brno 2009.
- [2] TRULOVE, J. Síť LAN. Mc.Graw - Hill, N.Y. 2006. (Ceský překlad – Grada Publ.)
- [3] DAUM, V., KRAUSER, J., ZAMZOW, P. E., ZIEMANN, O. POF - Polymer optical fiber for data communication. Berlin, Springer 2009.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

V rámci této diplomové práce se čtenář seznámí s polymerovými optickými vlákny (POF). Nejprve jsou zmíněny teoretické základy optických vláken a optického přenosu. Následují základní vlastnosti a významné parametry POF, bližší popis jednotlivých typů POF a jejich důležité přednosti i nedostatky ve srovnání s již zavedenými optickými vlákny na bázi skla. V další kapitole je popsána praktická oblast problematiky: práce s vlákny a instalace vláken, dále dostupné konektory a metody měření POF. Blíže jsou rozebrány poznatky z praxe, včetně možnosti využití v leteckém a automobilovém průmyslu, popř. v průmyslových, přístupových a lokálních sítích. Praktická část diplomové práce zahrnuje měření základních přenosových a mechanických parametrů včetně rozboru výsledků. Závěr práce shrnuje veškeré poznatky a dosažené výsledky této práce, včetně možného budoucího vývoje.

KLÍČOVÁ SLOVA

POF, polymerové optické vlákno, optický přenos, průmyslová síť, přístupová datová síť, lokální počítačová síť, optický senzor

ABSTRACT

In this diploma thesis, the reader is familiarized with polymer optical fiber (POF). Firstly is mentioned theoretical background of optical fibers and optical transmission. The following are the basic properties and significant parameters of POF, a more detailed description of each type POF and their essential advantages and disadvantages in comparison with established optical fibers based on glass. The next chapter describes the area of practical issues: working with fibers and fiber installation, as well as the available connectors and methods of measurement of POF. Closely are analyzed knowledge of the practice, including the utilize in the aerospace and automotive industries, as well as in industrial networks, access data networks and local area networks. The practical part includes the measurement of basic transmission and mechanical parameters, including analysis of the results. The conclusion summarizes all the findings and results of this work, including possible future developments.

KEYWORDS

POF, polymer optical fiber, optical transmission, industrial network, access data network, computer local area network, optical sensor

DOLEŽAL, Ondřej *Experimentální práce s POF - polymerová optická vlákna*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 67 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Experimentální práce s POF - polymerová optická vlákna“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Děkuji panu Ing. Petrovi Münsterovi, Ph.D. a panu Ing. Radimovi Šiftovi za cenné rady a připomínky.

Děkuji mé rodině za veškerou podporu, které se mi dostávalo po celou dobu mého studia.

Brno

.....

(podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Technická 12, CZ-616 00 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	11
1 Přenos optickým vláknem	12
1.1 Optické vlákno	12
1.2 Princip optického přenosu	12
1.2.1 Index lomu	12
1.2.2 Šíření světla	13
1.2.3 Numerická apertura	14
1.3 Obecný optický spoj	14
1.4 Ztráty optického vlákna	15
1.4.1 Útlum	15
1.4.2 Ztráty ohybem	16
1.4.3 Ztráty rozptylem	16
1.4.4 Ztráty absorpcí	16
1.4.5 Ztráty disperzí	17
2 Vlastnosti POF	18
2.1 Prvotní vývoj	18
2.2 Vlákná POF se skokovou změnou indexu lomu (SI-POF)	18
2.3 Vlákná POF s proměnou změnou indexu lomu (GI-POF)	21
2.4 Srovnání se skleněnými vlákny	23
2.5 Srovnání s metalickou kabeláží a bezdrátovými standardy	24
3 Práce s POF	25
3.1 Instalace	25
3.2 Spojování a zakončení	25
3.2.1 Konektory	26
3.2.2 Systém zakončení vlákna nevyžadující konektor	27
4 Oblasti využití POF	28
4.1 Automobilový průmysl	28
4.1.1 Standard MOST	28
4.1.2 Standard D2B	30
4.1.3 IEEE 1394	30
4.1.4 Ostatní technologie	30
4.2 Letecký průmysl	30
4.3 Průmyslové sítě	31
4.4 Počítačové sítě	32

4.4.1	Optická přístupová síť	32
4.4.2	Varianta FTTH	33
4.4.3	Varianta FTTB	35
5	Měření parametrů POF	36
5.1	Měření útlumu	36
5.2	Dosah optického spoje	36
5.3	Kvalita konce vlákna	39
5.4	Spojování POF v praxi	41
5.5	Vliv makro ohybů	42
5.5.1	Optické vlákno ITU-T G.657	43
5.5.2	Optické vlákno SI-POF	45
5.5.3	Výsledky srovnání	46
5.6	Teplotní závislost	47
5.6.1	Kladné teploty	47
5.6.2	Záporné teploty	49
5.7	Optovláknový senzor	51
5.7.1	Senzor hladiny kapaliny	51
5.7.2	Senzor s reflexní destičkou	54
5.8	Vyzařovací charakteristika	55
5.8.1	Výpočet Numerické apertury	56
6	Závěr	59
	Literatura	60
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	63
	Seznam příloh	66
A	Obsah DVD	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Polymerové optické vlákno.	12
1.2	Situace při šíření světelného paprsku optickým vláknem.	13
1.3	Přechod světelného paprsku z vnějšího prostředí do optického vlákna.	15
1.4	Schéma obecného optického spoje.	15
2.1	Šíření paprsků světla v SI-POF vláknem.	18
2.2	Útlumová charakteristika SI-POF vlákna.	19
2.3	Šíření paprsků světla v GI-POF vláknem.	21
2.4	Útlumová charakteristika různých druhů GI-POF vláken [4].	22
2.5	Srovnání velikosti průměru POF a vláken na bázi skla.	23
3.1	Srovnání průměru POF vlákna s jinými druhy kabelů.	25
3.2	TosLink: konektor a optický port.	27
4.1	Topologie sítě MOST.	28
4.2	Struktura rámce MOST25.	29
4.3	Návrh přístupové sítě s využitím skleněných a POF vláken.	33
4.4	Sít FTTH s využitím POF vláken v lokální síti.	34
4.5	Sít FTTB s využitím POF vláken v lokální síti.	35
5.1	Obecné schéma měření útlumu vlákna.	36
5.2	Převodník OPTOKON CS-240-2.	37
5.3	Zapojení při měření vložného útlumu.	37
5.4	Dvojce převodníků OPTOKON CS-240-2 v zapojení s útlumovým článkem.	38
5.5	Vady konce vlákna: a) nerovnosti, b) střešina v plášti, c) vyštípnutí jádra.	40
5.6	Nástroj k zalomení konce POF vláken.	40
5.7	Optická spojka pro systém OptoLock.	41
5.8	Vliv makro ohybů na šíření paprsku v optickém vlákně.	43
5.9	Graf závislosti útlumu na ohýbání a počtu závitů vlákna G.657.	45
5.10	Graf závislosti útlumu na ohýbání a počtu závitů vlákna SI-POF.	46
5.11	Termokomora během měření.	48
5.12	Graf závislosti útlumu na zvyšování teploty do kladných hodnot.	49
5.13	Graf závislosti útlumu na snižování teploty do záporných hodnot.	50
5.14	Schéma při měření senzoru hladiny.	52
5.15	Schéma při měření senzoru s reflexní destičkou.	54
5.16	Graf závislosti výkonu na oddalování vlákna od destičky.	55
5.17	Schéma při měření numerické apertury.	56
5.18	Graf vyzařovací charakteristiky na konci POF vlákna.	57

SEZNAM TABULEK

2.1	Parametry SI-POF kabelu Firecomms FC-500-0xB.	20
2.2	Parametry GI-POF kabelu Thorlabs 50SR.	22
2.3	Srovnání přenosových médií.	24
5.1	Výsledky měření optického spoje.	38
5.2	Výsledky měření kvality zakončení vlákna pomocí nástrojů.	40
5.3	Výsledky měření kvality broušení vlákna.	41
5.4	Mechanické parametry optického vlákna G.657.A1 dle doporučení ITU-T.	44
5.5	Naměřené hodnoty při ohýbání vlákna G.657.A1.	44
5.6	Naměřené hodnoty při ohýbání vlákna SI-POF.	45
5.7	Vybrané hodnoty z měření kladné teploty.	49
5.8	Vybrané hodnoty z měření záporné teploty.	50
5.9	Měření senzoru hladiny bez optické čočky.	53
5.10	Měření senzoru hladiny s optickou čočkou.	53
5.11	Měření optického senzoru využívající reflexní destičku.	55
5.12	Výsledky měření vyzařovací charakteristiky.	57

ÚVOD

Optická vlákna jsou nedílnou součástí moderních telekomunikačních sítí. Již mnoho let jsou ve velkém využívána na dálkových a vysokorychlostních trasách. Právě přenos velkého množství dat na velkou vzdálenost bylo hlavním důvodem nasazování optických vláken místo metalického vedení.

Nicméně optická vlákna jsou dnes běžně používána v nejrůznějších oblastech každodenního života, například automobilový a letecký průmysl, kde se využívá odolnosti vůči elektromagnetickému rušení. Kromě datových přenosů lze využít i fyzikální podstaty přenosu světla a využít vlákno jako senzor. V práci je detailně popsáno oboje.

Oblast datových sítí a telekomunikací je v současnosti poměrně jasně vymezena: na dlouhé vzdálenosti skleněná vlákna a do lokálních sítí metalickou kabeláž. POF vlákna dnes nejsou v počítačových sítích příliš vidět. V několika kapitolách je pojednáno o stěžejních parametrech určující přenosové parametry a jsou nastíněna možná řešení.

POF vlákna se zdají být do budoucna velmi flexibilním řešením, které by řešilo mnohé kritické problémy současných sítí a které dostupné technologie a prostředky nedokáží účinně řešit. Poslední roky vývoje jsou ve znamení „optiky do domu“, tedy modernizace přístupové sítě pomocí optických vláken. Vlákna POF by mohla do budoucna představovat koncept „optika na stůl“ a tím zcela nahradit strukturovanou kabeláž v počítačových sítích.

Tato diplomová práce má za cíl seznámit čtenáře se základními vlastnostmi POF vláken, jejich přednostmi i nedostatky, srovnat parametry se skleněnými vlákny a ukázat praktické možnosti instalace a použití, především pak v oblasti přístupových a lokálních sítí v automobilovém a leteckém průmyslu, jakož to i průmyslovém odvětví obecně.

V rámci práce je také provedeno několik měření základních parametrů optických vláken a optické sítě tvořené POF vlákny.

Závěr je věnován konečnému posouzení POF vláken a jejich budoucí vývoj.

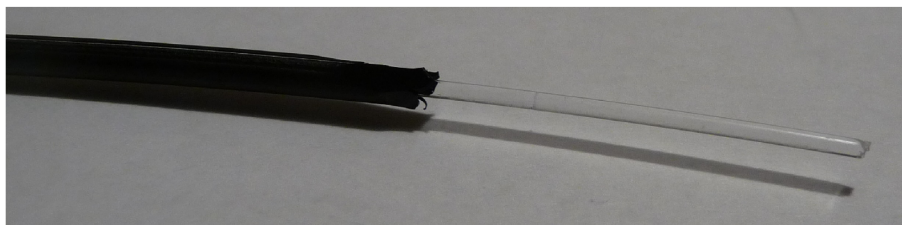
1 PŘENOS OPTICKÝM VLÁKNEM

1.1 Optické vlákno

Optické vlákno je přenosové médium sloužící k vhodnému vedení paprsku světla. Paprsek světla je tvořen fotony které nesou informaci. Vlákno je složeno nejméně ze dvou částí, z jádra a pláště. Dalšími vrstvami jsou přidáné ochranné vrstvy (primární ochrana, sekundární ochrana, atp.) [12]. Materiál, ze kterého je optické vlákno vyrobeno má rozhodující vliv na přenosové parametry. Prvním druhem jsou vlákna ze speciálních druhů skla. Druhý typ jsou polymerová (někdy též plastová) optická vlákna (anglicky Polymer Optical Fibers), viz fotografie 1.1. POF se vyrábí z polymerů, tedy látek s dlouhými řetězovými strukturami stejných molekul.

Podle toho, jak velký je poloměr jádra lze dělit optická vlákna na jednovidová a vícevidová:

- **Jednovidové** je takové optické vlákno, ve kterém se šíří jediný vid světla, přičemž poloměr jádra odpovídá několika vlnovým délkám v řádu μm .
- **Vícevidové** optické vlákno má poloměr jádra je dostatečně velký na to, aby se jím šířilo více vidů. Patří sem všechny druhy POF, poloměr je obvykle v řádu desítek nebo stovek μm .



Obr. 1.1: Polymerové optické vlákno.

1.2 Princip optického přenosu

1.2.1 Index lomu

Index lomu n je bezrozměrná veličina, která popisuje šíření světla v různých látkách [11]. Vztah

$$n = \frac{c}{v} [-], \quad (1.1)$$

vyjadřuje poměr rychlosti světla ve vakuu c k rychlosti světla v daném materiálu v . Např. hodnota indexu lomu pro vzduch za normálního tlaku je 1,00026, čímž se blíží k hodnotě vakua, pro které je $n = 1$. V praxi je rozdíl indexů lomu jádra a pláště

relativně malý, například POF vlákno použité při praktických měření v této práci (kapitola 5), má hodnoty indexu lomu jádra 1,492 a pláště 1,417.

1.2.2 Šíření světla

Šíření světla v optických vláknech definuje Snellův zákon. Ten popisuje šíření paprsků v případě, že světlo přechází lomem z prostředí s jedním indexem lomu do jiného prostředí s odlišným indexem lomu:

$$n_1 \cdot \sin \theta_i = n_2 \cdot \sin \theta_r, \quad (1.2)$$

kde θ_i je úhel dopadu a θ_r úhel lomu a n_1 a n_2 indexy lomu jádra a pláště.

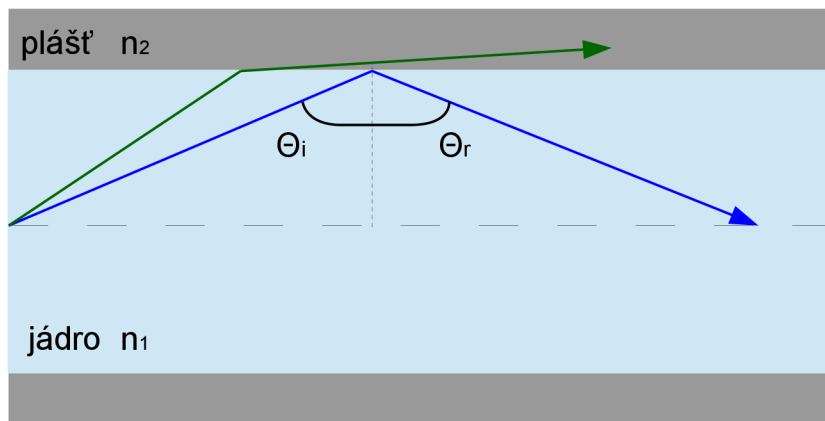
Přenos světla v optickém vlákne je založen na úplném odrazu světla na rozhraní dvou prostředí s rozdílnou hodnotou indexu lomu. Dopadající paprsek je zcela odražen na rozhraní jádra a pláště. Důsledkem toho je, že paprsek zůstává uvnitř jádra. Při úplném odrazu je úhel lomu $\theta_r = 90^\circ$, to odpovídá hodnotě $\sin \theta_r = 1$. To vyjádříme z rovnice 1.2 a dostaneme vztah pro úplný odraz:

$$\sin \theta_i = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.3)$$

Mezní úhel dopadu θ_i je

$$\theta_i = \arcsin \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.4)$$

Paprsky světla, které dopadají na rozhraní jádro – plášť pod úhlem větším, než je mezní úhel dopadu θ_i se zcela odráží zpět do jádra (na obrázku 1.2 modrý paprsek). Pokud by byl úhel dopadu menší než mezní, nedojde k úplnému odrazu a většina energie paprsku je vyzářena mimo jádro do pláště [30].



Obr. 1.2: Situace při šíření světelného paprsku optickým vláknem.

Aby byla splněna podmínka úplného odrazu, musí být index lomu jádra n_1 vyšší hodnoty než index lomu pláště n_2 . Platí:

$$n_1 > n_2. \quad (1.5)$$

Je to dáno tím, že při průchodu paprsku z opticky hustšího prostředí (jádro) do opticky řidšího prostředí (plášť), nastává požadovaný lom od kolmice a ve spojení s již dříve zmíněným mezním úhlem dopadu jsou vytvořeny podmínky pro vznik úplného odrazu.

Doteď byla popsána situace, kdy je již paprsek ve vlákne, nicméně pro optický přenos je taktéž důležitá situace kdy paprsek do vlákna teprve přechází z okolního prostředí. To je popsáno v následující kapitole 1.2.3.

1.2.3 Numerická apertura

Numerická apertura, zkráceně *NA* popisuje účinnost přechodu (resp. navázání) paprsků ze zdroje záření do jádra optického vlákna.

Je dána vztahem:

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} [-], \quad (1.6)$$

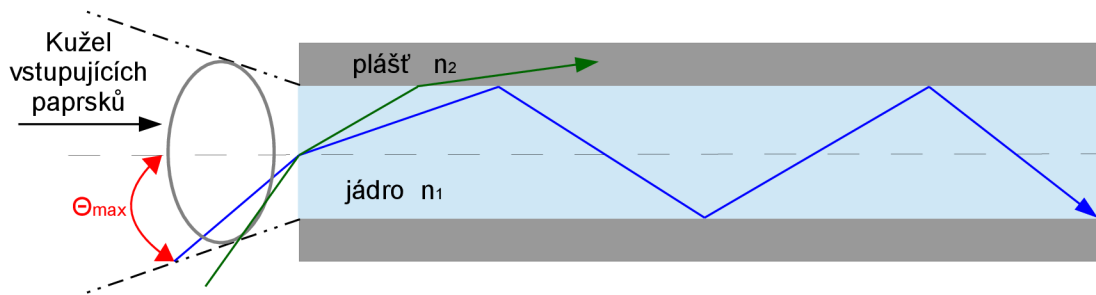
kde n_0 je index lomu prostředí, z kterého je světlo navázáno do vlákna (pro vzduch přibližně platí $n_0 = 1,003$), n_1 a n_2 indexy lomu jádra a pláště. Paprsky vstupující do vlákna musejí být navázány pod úhlem menším než θ_{\max} . V opačném případě nedojde k totálnímu odrazu a paprsek se láme do pláště nebo ven z vlákna. Vlivem nesprávného navázání světla dochází k nenávratné ztrátě části energie a důsledkem toho je zhoršení parametrů optického spoje.

Navázání světelného paprsku do jádra optického vlákna zobrazuje obrázek 1.3. Správně vedený paprsek má modrou barvu. Největší možný úhel navázání paprsku do jádra je označen jako θ_{\max} . Kužel všech vstupujících paprsků z prostoru před vlákem je definován jako $2 \cdot \theta_{\max}$. Nežádoucí situace je vyjádřena zeleným paprskem. Ten překračuje úhel θ_{\max} a láme se do pláště vlákna kde je pohlcen.

1.3 Obecný optický spoj

Optický spoj na obrázku 1.4 obsahuje tři základní celky: vysílač, optické vlákno a přijímač.

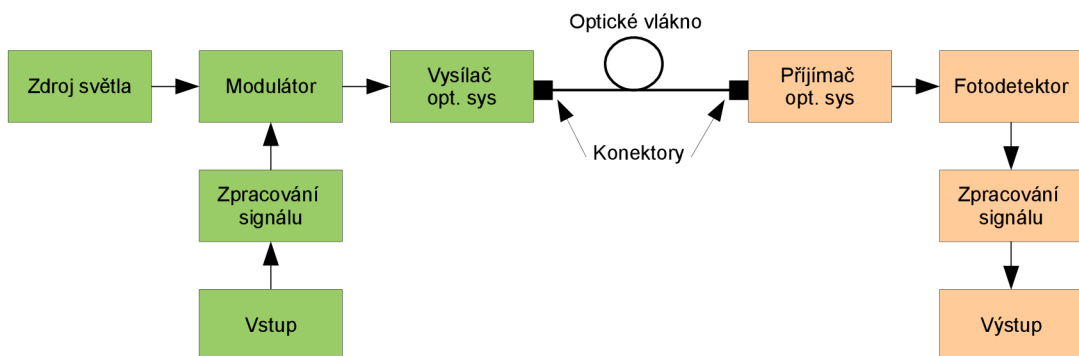
Vysílač je tvořen zdrojem světla (luminiscenční nebo laserová dioda), který je modulován v optickém modulátoru. Na ten je přiveden vstupní elektrický signál z obvodů pro zpracování signálu. Modulovaný signál je dále předán do bloku vysílače



Obr. 1.3: Přechod světelného paprsku z vnějšího prostředí do optického vlákna.

optického systému. Přes vstupní konektor je paprsek navázán do optického vlákna. Vlákno zajišťuje vhodné vedení paprsku. Na přijímací straně je opět přítomen konektor, dále následuje fotodetektor na kterém je zachyceno světlo a převedeno opět na elektrický signál. Ten je vhodně zpracován a předán dál jako výstupní signál.

Výše uvedený princip realizuje komunikaci pouze jedním směrem, pokud potřebujeme přenášet současně komunikovat obousměrně (duplexně) je potřeba na každé straně přenosu vytvořit vysílač i přijímač.



Obr. 1.4: Schéma obecného optického spoje.

1.4 Ztráty optického vlákna

1.4.1 Útlum

Na začátku vlákna je zdroj záření který vyzařuje světlo. Paprsky světla jsou navázány do vlákna s určitou úrovní výkonu. S narůstající vzdáleností od zdroje světlo ztrácí svoji energii, klesá hodnota výkonu a tím narůstá útlum A .

Nejčastěji útlum udáváme v logaritmickém měřítku pomocí vztahu

$$A = 10 \log \frac{P_{\text{vst}}}{P_{\text{vyst}}} \text{ [dB]}, \quad (1.7)$$

ten vyjadřuje poměr mezi výkonem na začátku vlákna P_{vst} a konci vlákna P_{vyst} .

Pokud chceme vyjádřit útlum celé optické trasy, která se skládá z optického vlákna o délce L , potom zavedeme tzv. měrný útlum α :

$$\alpha = \frac{A}{L} = \frac{10}{L} \log \frac{P_{\text{vst}}}{P_{\text{vyst}}} \text{ [dB/km]}. \quad (1.8)$$

Příčiny vzniku ztrát optického výkonu jsou dvojího druhu. První oblastí je vložný útlum, který je způsobován různými částmi optického spoje, např. přechodem paprsku ze vzduchu do vlákna, spoj mezi konektorem a vláknem, spoj mezi vláknem a jiným vláknem. Tyto ztráty nelze zcela odstranit, lze je pouze minimalizovat volbou vhodných postupů a komponent, které vykazují co nejmenší vložný útlum.

Druhou oblastí jsou ztráty způsobené fyzikálními, geometrickými a výrobními vlastnostmi vlákna. Zde záleží na více faktorech jak minimalizovat ztráty. Tento druh je ztrát je možné dělit na ztráty ohybem, rozptylem a absorpcí [12].

1.4.2 Ztráty ohybem

Tento typ ztrát vzniká ohýbáním vlákna kdy vzniknou nežádoucí ohyby. Ohyb vlákna způsobuje porušení podmínky úplného odrazu světla, protože ohyb vyvíjí tlak na vlákno a tím způsobuje změnu indexu lomu pláště a jádra. U POF vláken jde o typ ztrát s největším dopadem. Kompenzace je možná. Zvolíme velké poloměry ohybu, při návrhu trasy nebo použijeme vlákna s dvojitým indexem lomu tzv. DSI-POF.

1.4.3 Ztráty rozptylem

Rozptyl způsobují nečistoty a nehomogenity vzniklé při výrobě vlákna. Když paprsek světla dorazí na překážku na své trajektorii, část jeho energie se vyzáří mimo původní trasu a dojde k poklesu úrovně výkonu. Dělení je následující:

- **Rayleigho rozptyl** je druh rozptylu, který je zapříčiněn miniaturními nehomogenitami materiálu, z kterého je optické vlákno vyrobeno. Velikost těchto nehomogenit je menší než vlnová délka navázaného záření. Snížení vlivu tohoto druhu rozptylu je závislé na výrobní technologii.
- **Mienův rozptyl** je způsoben mikroskopickými bublinkami, napětím a nedokonalostmi ve vlákně, srovnatelnými s použitou vlnovou délkou.
- **Rozptyl na nečistotách** lze charakterizovat podobně jako Mienův, ale velikost nečistot je větší než vlnová délka.

1.4.4 Ztráty absorpcí

Jedná se o jev, kdy se elektromagnetická energie mění na tepelnou:

- **Vlastní absorpce** je neodstranitelná a záleží na použité vlnové délce a materiálu. U POF vláken poměrně zanedbatelná.
- **Příměsová absorpce** je způsobována volnými molekulami látek ve vlákně. Nejčastěji se jedná o vodní ionty (OH). Důsledkem je vznik mikrotrhlin a tím narušení celistvosti vlákna. Volné ionty také zapříčiňují vysoký nárůst útlumu na určitých vlnových délkách.

1.4.5 Ztráty disperzí

Disperze způsobuje rozprostření energie paprsku v čase, dojde tedy ke zkreslení přenášeného signálu. Disperze má přímý vliv na omezení dostupné šířky pásma a ve výsledku i na přenosovou rychlost. POF vlákna jsou disperzí ovlivňována, záleží na konkrétním druhu [7]:

- **Vidová disperze.** Ve vlákně, ve kterém se přenáší více vidů se jednotlivé vidy šíří po různě dlouhých drahách, to znamená, že čas, který je potřeba k šíření není stejný. Výsledkem je rozšíření vstupního pulzu. Týká se mnohavidových optických vláken se skokovou změnou indexu lomu, tedy včetně POF. Svoji roli hraje i Numerická apertura, jejíž hodnota ovlivňuje zpoždění jednotlivých módů. Například u vláken ze sloučeniny PMMA může časový rozdíl dosahovat až 25 ns na 100 metrů při hodnotě numerické apertury $NA = 0,50$. Obecně lze říci, že se zvyšující se NA klesá šířka pásma.
- **Chromatická disperze** je založena na kmitočtové závislosti indexu lomu. To znamená, že se jednotlivé frekvence (resp. vlnové délky) ve vlákně šíří po různých optických drahách. Důvodem vzniku je, že reálný zdroj světla nikdy nevyzařuje přesně na jediné vlnové délce. Spektrální čára zdroje kromě střední hodnoty zasahuje i do postranních vlnových délek. Tento druh disperze je velmi důležitý pro jednovidová vlákna. Naopak u vícevidových se tolik neuplatní, na rozdíl od disperze vidové. Chromatická disperze se skládá z materiálové disperze, která má podobný způsob vzniku a je závislá na materiálu vlákna a z vlnovodné disperze, ta zohledňuje geometrické vlastnosti vlákna, které ovlivňují rychlost šíření a kmitočet vidů.

2 VLASTNOSTI POF

2.1 Prvotní vývoj

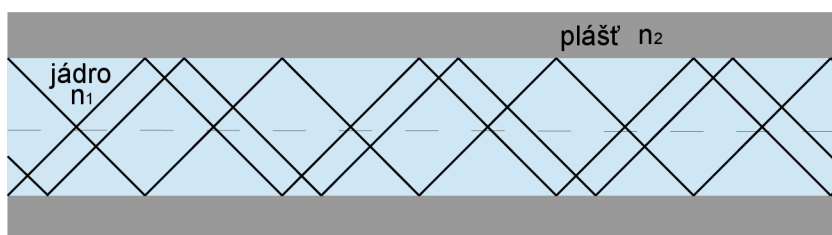
První plastová optická vlákna byla vyrobena již v 60. letech 20. století. Vzhledem k nedokonalostem výroby a použitým materiálům byly parametry těchto vláken velmi omezující pro praktické použití, například útlum dosahoval až 1000 dB/km. V průběhu sedmdesátých let se podařilo útlum vláken snížit až k hodnotě 125 dB/km při použití vlnové délky 650 nm.

Druhou vlnu zájmu o POF lze vysledovat v počátcích 90. let, kdy nastává globální vzestup informačních technologií a tím i poptávky po navyšování přenosových kapacit. Záhy se ukázalo, že se otvírají zcela nová odvětví průmyslu, kde by se mohla POF uchytit. Jedním takovým byl automobilový průmysl, kde byla velká poptávka po nových materiálech s lepšími parametry.

V roce 1992 se konala International Conference for Polymer Fibers and Application na které bylo představeno mnoho nových a slibně se rozvíjejících projektů, které měly záhy určit směr vývoje. V následujících letech zájem o POF vlákna opět narůstal a brzy se začaly objevovat první výsledky. Zhruba po roce 2000 se mnohé parametry natolik zlepšily, že se dá mluvit o konkrétních řešení které je možno ihned používat.

2.2 Vlákna POF se skokovou změnou indexu lomu (SI-POF)

U POF tohoto typu se paprsek ve vlákne šíří skokově. To je způsobeno rozdílnou hodnotou indexu lomu jádra a pláště. Princip šíření je zobrazen na obrázku 2.1.



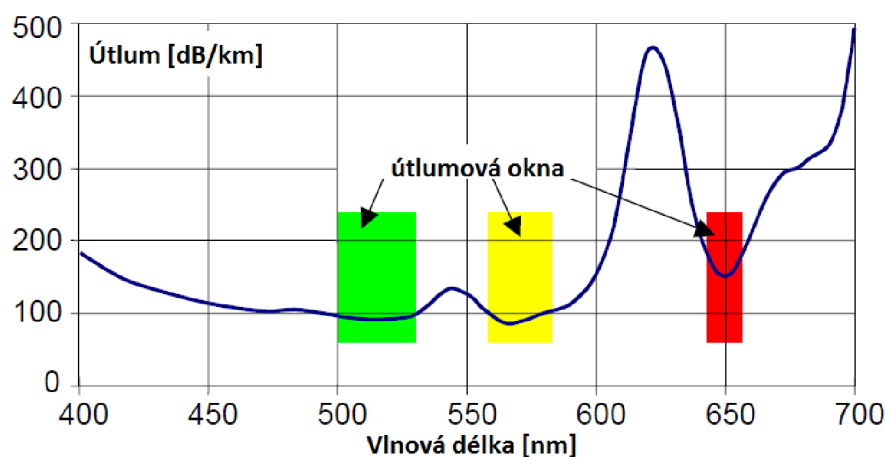
Obr. 2.1: Šíření paprsků světla v SI-POF vlákně.

SI-POF (Step Index POF) vlákna představují vývojově nejstarší typ POF vláken, první pokusy o výrobu byly provedeny již v 70. letech 20. století. Převažující výrobní sloučenina je PMMA (Polymethylmethakrylát). Prvotní uplatnění SI-POF bylo v

automobilovém průmyslu (standard MOST) a průmyslové automatizaci (standard PROFINET). Následně došlo k rozšíření i do spotřební elektroniky a telekomunikací.

V roce 1988 se podařilo přenést na vzdálenost 20 metrů data rychlostí 20 Mb/s a následně v roce 1990 navýšit rychlost přenosu až na 140 Mb/s. Útlum vlákna začínal kolem 300 dB/km a postupně klesal až k dnešním hodnotám v rozsahu 180 až 60 dB/km. [7].

Vlákno se skládá z jádra, které má typické rozměry 990 μm a index lomu 1,492 (popř. různé varianty až do hodnoty 1,500). Zbytek vyplňuje plášť s průměrnou tloušťkou 10 μm a indexem lomu 1,412. Většina vláken obsahuje jednoduchou ochranu s tloušťkou v řádu několika milimetrů. Útlumová charakteristika je vykreslena v grafu na obrázku 2.2, podle [28].



Obr. 2.2: Útlumová charakteristika SI-POF vlákna.

Ve výše uvedeném grafu jsou zobrazena tři útlumová okna, na kterých má vlákno nejmenší útlum a jsou tedy nejvíce vhodná pro přenos. Konkrétně jde o 520 nm (zelená), 560 nm (žlutá) a 650 nm (červená).

Jako zdroj světla se používají luminiscenční diody (LED), které jsou jednoduché na výrobu a velmi levné. Jejich vyzařovací charakteristika je oproti laseru násobně širší a přesnost nosné vlnové délky je ± 10 nm. Chromatická disperze má obvykle hodnotu přibližně $300 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, což je zhruba $20\times$ více než u skleněných vláken. POF vlákna obecně, jsou mnohavidová, počet vidů je určen typem zdroje a vlastností vlákna.

Vlákna SI-POF mají Numerickou aperturu (NA) nejčastěji kolem hodnoty 0,5, proto jsou také známé pod označením NA-POF nebo standardní POF. Vzhledem k velkému průměru jádra a vysoké Numerické apertuře má tento typ vlákna šířku přenosového pásma znatelně omezenou, přibližně na hodnotu 40 až 50 MHz při délce vlákna 100 m. Vhodnost pro datové přenosy je omezená vzhledem k znatelné

disperzi signálu, viz kapitola 1.4.5. Dosažené přenosové rychlosti jsou standardně do 100 Mb/s a další navyšování je problematické bez použití pokročilejšího typu modulace nebo změnou výrobního procesu [7]. I přes popsané nevýhody jsou SI-POF v současnosti nejrozšířenějším druhem POF.

V průběhu vývoje vznikli různé modifikace SI-POF vláken a nebo rovnou na zcela jinou konstrukci vlákna. Modifikovaná SI-POF vlákna nejsou příliš běžná, proto budou v následujícím přehledu jen krátce zmíněna:

- **POF se sníženou hodnotou numerické apertury (Low NA-POF).** Hlavní vlastností je snížení NA na 0,3 a tím navýšení šířky přenosového pásma na 100 MHz na 100 metrů. Vzhledem k velké citlivosti na ohyby se nedají v praxi dost dobře použít.
- **POF s dvojitým skokovým indexem lomu (DSI-POF)** má dvě vrstvy pláště, vnitřní a vnější. Světlo se láme na jednom, nebo druhém plášti v závislosti na poloměru ohybu. Tento princip řeší problém příliš vysokých ztrát ohybem, které byly u Low NA-POF.
- **POF s mnohonásobným skokovým indexem lomu (MSI-POF)** má několik, běžně 4 až 7 vrstev jádra nad sebou. Cílem bylo dosáhnout lepších výsledků než předchozí typ vláken DSI-POF při udržení jednoduché výrobní technologie a zároveň se přiblížit k lepším parametrům GI-POF vláken (viz dále).
- **POF s mnoha jádry (MC-POF)** obsahuje desítky či stovky jader které vykazují vlastnosti standardních jader u SI-POF vláken. Tyto vlákna mají opět sníženou NA na hodnotu 0,30. Výhodou je malý poloměr ohybu 3 mm.

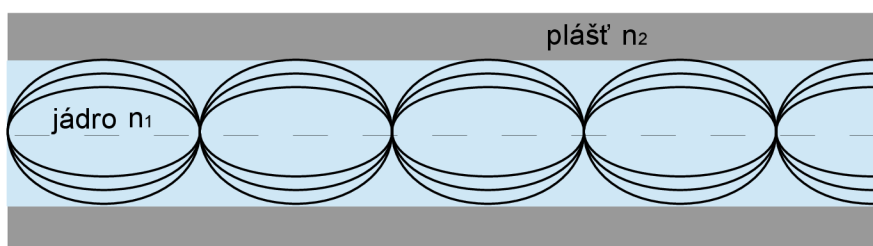
V následující tabulce 2.1 je ukázka parametrů a jejich hodnot u komerčně dostupného SI-POF kabelu od firmy Firecomms [26]:

Tab. 2.1: Parametry SI-POF kabelu Firecomms FC-500-0xB.

Parametr	min.	max.	typicky
Numerická apertura [-]			0,50
Útlum při $\lambda = 650$ nm [dB/m]			0,19
Průměr vlákna včetně pláště [mm]	0,94	1,00	1,06
Průměr kabelu – simplex [mm]	2,13	2,20	2,27
Průměr kabelu – duplex [mm]	4,30	4,40	4,50
Skladovací teplota [°C]	-40	+85	
Provozní teplota [°C]	-40	+85	
Minimální poloměr ohybu [mm]		25	
Opakovaný počet ohýbání		10000×	
Namáhání tahem simplex/duplex [N]	70/140		

2.3 Vlákna POF s proměnou změnou indexu lomu (GI-POF)

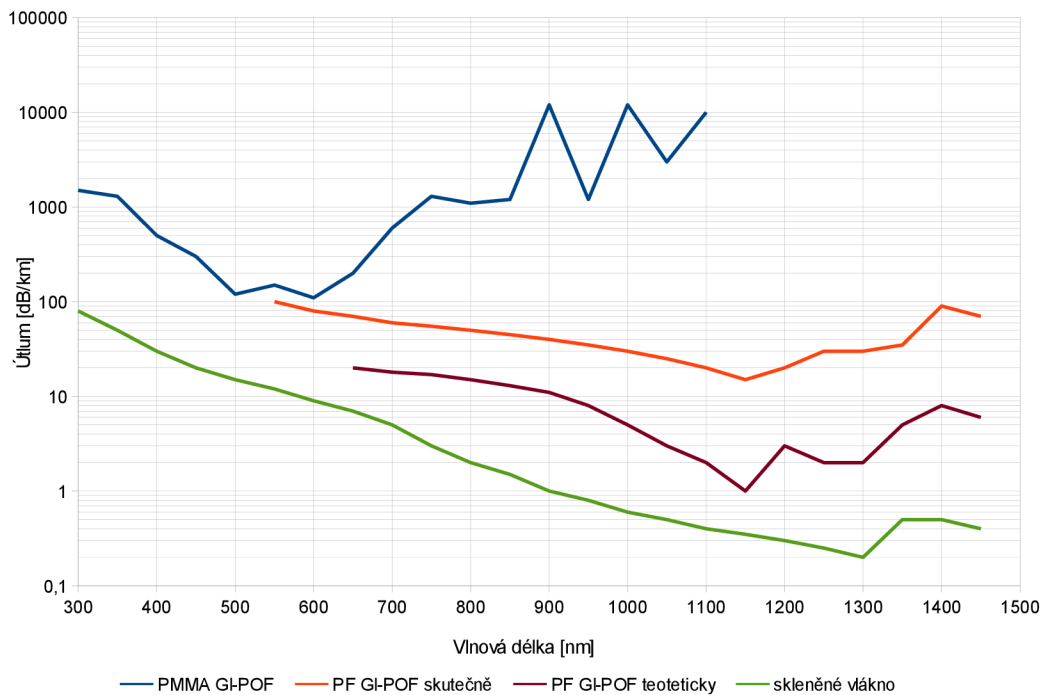
Vlákna GI-POF (Graded Index POF) mají proměnou (gradientní) změnu indexu lomu světla. Index lomu se snižuje v závislosti na vzdálenosti od středu osy jádra k plášti vlákna. Paprsek světla se nešíří skokově, ale plynule (více paprsků tak vytváří sinusový). Pro lepší představu je na obrázku 2.3 zobrazeno šíření paprsků světla v GI-POF vláknu.



Obr. 2.3: Šíření paprsků světla v GI-POF vláknu.

Gradientní změny je dosaženo při výrobě vlákna, kdy se na sebe vrství struktury jádra, které jsou různého materiálového složení. Důsledkem postupné změny indexu lomu je, že se vidy ve vlákne šíří podél středu jádra. Výsledkem je minimální časový rozdíl, kdy jednotlivé vidy dorazí na konec vlákna a tím je minimalizována vidová disperze. Kvůli snížení vidové disperze dojde k navýšení šířky pásma pro přenos informace. U vláken založených na standardní sloučenině PMMA se hodnota útlumu pohybuje kolem 200 dB/km na přibližně 100 metrů. Současný vývoj se zaměřuje na výrobu vláken z fluorovaných polymerů (tzv. PF-GI-POF). Tyto vlákna mohou mít útlum snížen až k hodnotě 20 dB/km a šířku pásma přibližně od 1 GHz na 100 metrů až 4 GHz na 200 metrů [16].

Vzhledem k nízké disperzi signálu a sníženému útlumu, lze reálně překonat hranici přenosu 1 Gb/s, což je značný nárůst oproti běžnějšímu druhu SI-POF. Předmětem možného výzkumu je výběr vhodného zdroje světla. GI-POF mají nejnižší útlum v rozsahu vlnových délek 850 nm až 1300 nm (viz graf 2.4), což je již pásmo pro které nelze použít LED diody a bylo by potřeba dražších laserových diod. Při požadavku zachovat levné a široce používané LED diody jako zdroj světla, se pak rozdíl mezi SI-POF a GI-POF téměř stírají, zejména v případě nejběžnější vlnové délky pro POF a to 650 nm. Na druhou stranu, dříve rozšířená vícevidová vlákna na bázi skla využívala právě vlnové délky 850 nm a proto by zdroje záření s touto vlnovou délkou mohly být znovu použity pro GI-POF.



Obr. 2.4: Útlumová charakteristika různých druhů GI-POF vláken [4].

GI-POF vlákna se mohou do budoucna využít na delší vzdálenosti v řádu stovek metrů a k realizaci vlnového multiplexu WDM pro vysokorychlostní přenosy [4]. Již v roce 2006 bylo dosaženo zatím známého maxima rychlosti přenosu na plastových vláknech. Stalo se tak právě na typu GI-POF a dosaženo bylo 10 Gb/s na 100 metrů v laboratorním experimentu s VCSEL laserem na vlnové délce 850 nm [27]. Nicméně, od toho roku do současnosti, není běžně dostupné řešení s POF, které by nabízelo přenosy v řádech Gb/s. Ukázka parametrů komerčně dostupného GI-POF kabelu je v tabulce 2.2, další informace lze nalézt v [17].

Tab. 2.2: Parametry GI-POF kabelu Thorlabs 50SR.

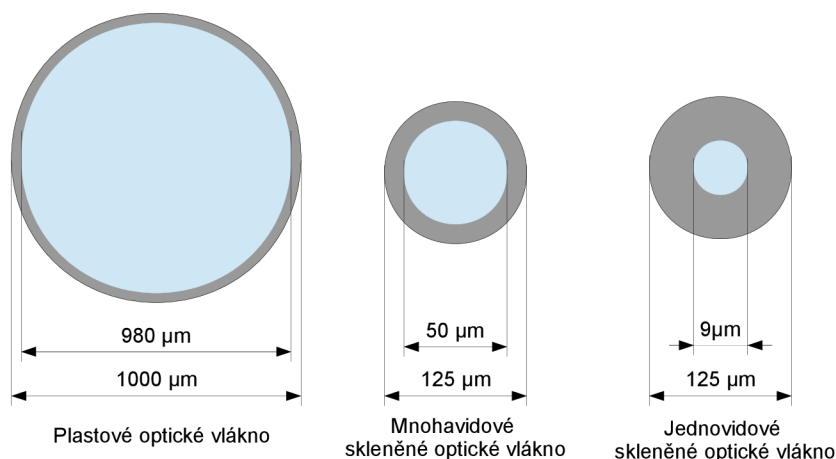
Útlum při 850 nm a 1330 nm	< 60 dB/km
Šířka pásma při 850 nm	> 300 MHz/km
Numerická apertura	$0,19 \pm 0,015$
Okno nulové disperze	1200-1650 nm
Disperze	$< 0,06 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$
Průměr jádra	$50 \pm 5 \mu\text{m}$
Průměr pláště	$490 \pm 5 \mu\text{m}$
Dlouhodobý ohyb	5 mm
Makro ohyb (25 mm)	< 0,25 dB

2.4 Srovnání se skleněnými vlákny

I když je princip přenosu pro oba typy vláken stejný, existují parametry ve kterých se významně liší. Podle vlastností obou typů vláken lze určit vhodnou, popř. nevhodnou oblast pro možné využití. Pod pojmem skleněná vlákna se zde rozumí křemenná vlákna včetně vláken s příměsemi. Vlastnosti shodné pro oba typy vláken:

- Odolnost vůči vnějšímu elektromagnetickému rušení.
- Odstranění problému s uzemněním.
- Mnohonásobně větší šířka pásma oproti metalickému vedení.
- Mnohonásobně menší měrný útlum na jednotku vzdálenosti než metalické vedení.
- Jednodušší údržba a delší životnost.

Přibližné srovnání rozměrů obou dvou typů vláken je znázorněno na obrázku 2.5. Modrá barva představuje jádro a šedá plášť vlákna:



Obr. 2.5: Srovnání velikosti průměru POF a vláken na bázi skla.

POF vlákna mají ve srovnání se skleněnými tyto vlastnosti:

- Rozměry vlákna jsou větší. Jádro a plášť vlákna mají dohromady průměr přibližně 1 mm, přičemž jádro zaujímá většinu, zhruba 980 až 990 μm.
- Útlum je mnohonásobně větší. V současné době se pohybuje od 20 do 200 dB/km v závislosti na použitém materiálu, výrobním procesu, zdroji záření a provozních podmínkách. Pro srovnání běžné jednovidové skleněné vlákno vykazuje při vlnové délce 1310 nm útlum 0,2 dB/km.
- Vzhledem k vysokému útlumu nelze předpokládat dosažení přenosových tras jako u skleněných vláken. U POF vláken se pohybuje v řádech desítek, max, několik stovek metrů na kterých lze přenos prakticky realizovat. Většina současných řešení je určena pro přenos na vzdálenost maximálně 100 metrů.

- Velkou výhodou je, že práce s POF vlákny nevyžaduje odborných znalostí a speciálních nástrojů, např. při spojování a zakončování vláken. Instalace i spojování vlákna přibližně odpovídá práci s metalickými vodiči.
- Materiálová pružnost je větší. POF vlákno je pružnější a dovoluje ohnutí pod větším úhlem.
- Teplotní odolnost POF vláken je přibližně 100 °C a ve výjimečných případech až 200 °C.
- POF jsou mechanicky odolnější vůči ohybu a kroucení.
- Většina komponent potřebných pro přenos pomocí POF je dostatečně levná na to, aby si je mohli dovolit i běžní uživatelé do domácích podmínek.

2.5 Srovnání s metalickou kabeláží a bezdrátovými standardy

Z pohledu lokálních sítí nelze opomenout i srovnání s metalickou kabeláží, která dnes představuje nejběžnější médium při budování kabelových rozvodů v domech a bytech. V posledních letech je kabeláž doplněna i bezdrátovými sítěmi, které přinášejí komfort pro uživatele mobilních zařízení, nicméně bezdrátový přenos je náchylný na vnější rušení. Druhým problémem je omezená kapacita sdílených frekvencí a případné rušení více zařízení vysílajících na stejném kmitočtu. V následující tabulce 2.3 jsou uvedeny současně používané druhy metalické kabeláže a bezdrátových standardů [29], [2]. U bezdrátových standardů je uvedena rychlost maximální teoretická rychlost fyzické vrstvy v ideálních podmínkách. U standardu IEEE 802.11ac je uvedena maximální rychlost v konfiguraci 2×2 antén při 160 MHz přenosovém kanálu.

Tab. 2.3: Srovnání přenosových médií.

Metalická kabeláž			
Označení	Šířka pásma [MHz]	Kabeláž	Aplikace
Kategorie 5 / 5e	100	UTP	LAN 1 Gb/s
Kategorie 6 / 6a	250 / 500	UTP / FTP	LAN 10 Gb/s
Kategorie 7 / 7a	600 / 1000	FTP, STP	LAN 10 Gb/s,

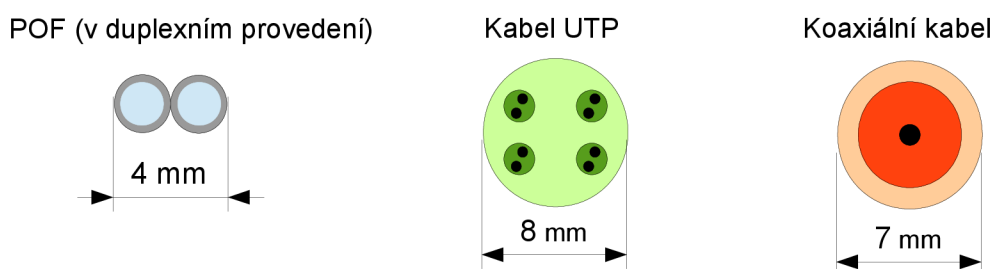
Bezdrátové standardy			
Standard	Šířka pásma [MHz]	Frekvence [GHz]	Aplikace
IEEE 802.11a	20	5	WLAN 54 Mb/s
IEEE 802.11g	20	2,4	WLAN 54 Mb/s
IEEE 802.11n	20, 40	2,4, 5	WLAN 135 Mb/s
IEEE 802.11ac	20, 40, 80, 160	5	WLAN 1,3 Gb/s

3 PRÁCE S POF

3.1 Instalace

Jednou z hlavních výhod POF vláken je jejich snadná instalace i běžným uživatelem, bez nutného odborného proškolení, jak by tomu mělo být u vláken na bázi skla. To je dáno použitým materiálem a rozměry vlákna. Průměr samotného plastového vlákna se pohybuje kolem hodnoty 1 mm, a minimálně další 1 mm je ochranný obal. Manipulace s vláknem je díky rozměrům snazší a nehrozí poškození vlákna neodborným zacházením. Nejčastěji se lze setkat s tzv. duplexním provedením, to znamená že pro každý směr přenosu je vyhrazeno samostatné vlákno. Obě tyto vlákna jsou vzájemně spojena a mluvíme tak o optickém kabelu.

Prostorové nároky POF jsou přibližně třetinové oproti metalické kabeláži (typu UTP) a podobná situace je i u koaxiálního kabelu, viz obrázek 3.1.



Obr. 3.1: Srovnání průměru POF vlákna s jinými druhy kabelů.

Vzhledem k uvedeným rozměrům mohou být POF vlákna snadno nainstalována ve stávajících trasách kabelových rozvodů společně s koaxiálním vedením kabelové televize nebo anténního rozvodu v domě, kam by se jinak další metalické kabely již nevešly.

3.2 Spojování a zakončení

POF vlákno může být zakončeno více způsoby:

- konektorem
- spojkou (s návazností na další vlákno)
- volně (při použití bezkonektorového spojení, viz 3.2.2)

Stejně jako u skleněných optických vláken, existuje mnoho typů konektorů, které se liší jak svým provedením, tak technickými parametry a v neposlední řadě i cenou. Lze předpokládat, že se POF vlákna časem budou stále více rozšiřovat do lokálních sítí k běžným, laickým uživatelům, kteří nejsou seznámeni s technikami práce s

optickými vlákny. Proto je hlavním požadavkem v oblasti spojování jednoduchost, bezpečnost a cena.

Zjednodušeně lze konektory rozdělit do dvou oblastí:

1. Konektory již dříve používané se skleněnými vlákny a pro potřeby plastových vláken se jen mírně upravily.
2. Konektory speciálně vyvinuté pro konkrétní oblast použití POF, jako je průmysl, multimédia a nebo vlastní standard určité organizace.

3.2.1 Konektory

V následujícím přehledu jsou uvedeny kromě běžně rozšířených konektorů i konektory méně běžné a speciální, aby si čtenář udělal představu v rozmanitosti dostupných technologií v oblasti spojování POF vláken [7].

- **V-pin** je firemní konektor společnosti Hewlett-Packard. Jednoduchý, plastový konektor skládající se z dvou částí. Do jedné se uchytí vlákno a na něj se nacvakne druhá část. Existuje jak ve variantě s, tak i bez nutnosti použití speciálních krimpovacích kleští.
- **FSMA** konektor je rozšířen hlavně v průmyslových aplikacích. Jde o oválný, šroubovací konektor z kovu, je rozebíratelný. Jeho složení a celková konstrukce je v celku komplikovaná. Běžná hodnota útlumu na konektoru je 1,5 dB.
- **ST** má podobné vlastnosti jako konektor FSMA, rozdíl je v poslední části. Ta je u ST konektoru ve tvaru bajonetu a díky tomu našel konektor uplatnění v oblasti plastových i skleněných vláken. Prodává se varianta z plastu nebo odolnější z kovu.
- **F07** je typ konektoru doporučovaný dle specifikací ATM Forum. Duplexní provedení, z plastu.
- **TosLink (F05)** je provedením simplexní konektor od společnosti Toshiba, který je velmi rozšířen v multimediální technice pro přenos vícekanálového zvuku ve vysoké kvalitě. Jeho hlavní výhodou je jednoduchá konstrukce. Jde o nerozebíratelný konektor pro POF vlákno o průměru 1 mm, viz obrázek 3.2.
- **SC**. V oblasti skleněných vláken jde o často používaný konektor, který se v simplexním nebo duplexním provedení vyrábí i pro POF vlákna. Je jednodušší konstrukce než SMA a ST konektory.
- **SMI** je duplexní konektor z plastu, který je zahrnut ve standardu IEEE 1394 (viz kapitola 4.1.3). Hlavní oblast použití je budoucí spojování periférií na krátké vzdálenosti.
- **Versatile-Link**. Jde o vlastní řešení firmy AVAGO, která vyvinula konektor speciálně pro POF vlákna. Složení konektoru je možno pouze se speciálními krimpovacími kleštěmi. Simplexní provedení.

- **LC** je široce používaný konektor optických prvků pro skleněná vlákna. Kvůli své rozšířenosti byl upraven pro POF. Je používán v řešení firmy Profimms.



Obr. 3.2: TosLink: konektor a optický port.

3.2.2 Systém zakončení vlákna nevyžadující konektor

Výše uvedené konektory jsou až na výjimky komplikované na sestavení, popř. k sestavení je potřeba speciálních nástrojů. Bylo tedy potřeba vyvinout systém, který by nevyžadoval předchozí znalosti v oblasti spojování optických vláken a byl by tak vhodný pro oblast běžných uživatelů, např. pro domácí lokální síť.

V oblasti POF dominuje systém OptoLock®. Jedná se o bezkonektorové řešení zakončení vlákna v téměř jakémkoli zařízení, které je vhodné pro připojení pomocí POF [1]. Práce s tímto systémem je velmi jednoduchá, jelikož není potřeba žádného nástroje k zakončení. Vlákno se jednoduše nasune do příslušné zdičky a zajistí se proti vytrhnutí. Mezi další výhody patří nízká cena a široké možnosti uplatnění.

OptoLock® je kompletní optické rozhraní. Systém využívá samostatná vlákna pro každý směr přenosu a proto je na každé straně přenosu integrován vysílač i přijímač. Optický port obsahuje vysílač s diodou LED na vlnové délce 650 nm a v přijímači je PIN fotodioda. Jako vlákno lze použít jakékoli standardní PMMA POF s max. průměrem 1 mm.

Přenosové rychlosti jsou nejčastěji 100 Mb/s, odpovídající standardu 802.3u – Fast Ethernet. V posledních letech se objevila i řešení dosahující 250 Mb/s nebo 1 Gb/s na SI-POF na vzdálenosti minimálně 50 metrů, nicméně bez jakékoli standardizace a téměř vždy se jedná o vlastní řešení konkrétního výrobce. V současné době je přenosovým systémem OptoLock® realizována většina řešení pro domácí síť. Kromě speciálních systémů jiných firem je rozšířen i v průmyslových sítích.

4 OBLASTI VYUŽITÍ POF

4.1 Automobilový průmysl

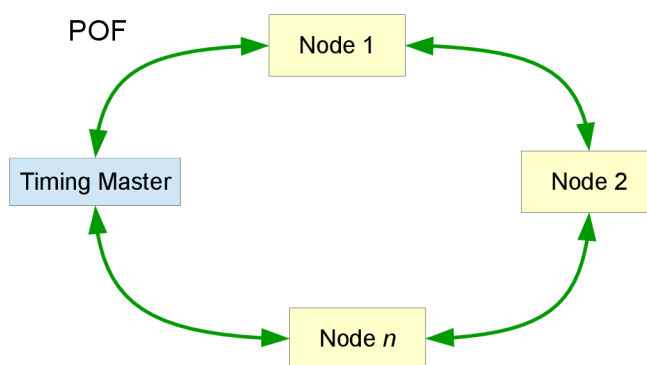
Začátky využití POF v tomto odvětví se datují k roku 1998, kdy jej začala používat automobilka Daimler Chrysler. Hlavním důvodem k přechodu na POF byl nárůst množství elektroniky v automobilech a to nejen té řídicí, ale i multimediální a doplňkové. Logicky se vycházelo z hlavních předností POF:

- nízká váha kabelů
- malý průřez kabelů
- odolnost vůči elektromagnetickému rušení

4.1.1 Standard MOST

MOST je zkratka pro Media Oriented System Transport, jedná se o souhrn doporučení pro multimediálně založené sítě v automobilech, které využívají POF jako přenosové médium mezi zařízeními. Vývoj a standardizace je řízena od roku 1998 organizací MOST Cooperation, přičemž první standard byl představen ve vozidlech BMW v roce 2001. V současné době je technologie MOST použita ve většině světových značek automobilů: Audi, BMW, Hyundai, Toyota, Volkswagen a další [25].

Z hlediska síťového ISO/OSI modelu je definována fyzická a spojová vrstva. Pro vyšší vrstvy je standardizováno rozhraní, na kterém jsou dostupné protokoly pro vývojáře a každý výrobce může implementovat vlastní funkce. Topologie je kruhová (viz obrázek 4.1) a lze do ní připojit až 64 zařízení (CD/DVD přehrávače, GPS navigace, LCD obrazovky, rádio,...), které se nazývají *Node* (uzel).



Obr. 4.1: Topologie sítě MOST.

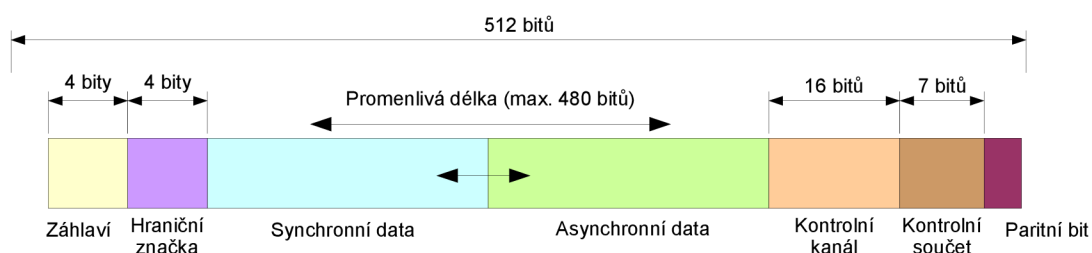
Jiné topologie jsou možné, ale ne zcela běžné: např. topologie hvězda s využitím

přepínačů. Další možností je redundantní zapojení dvou POF vláken, nazvané dvojitý kruh a slouží k zvýšení spolehlivosti sítě. Většina MOST sítí obsahuje speciální zařízení, tzv. *Timing master*, který se stará o synchronizaci v síti. *Timing master* posílá do sítě rámce rychlostí 44,1 nebo 48 kHz. Ostatní zařízení v síti tento rámec přijmou, použijí data ze záhlaví k vlastní synchronizaci, zpracují vlastní rámec, přidají svoje data do volného slotu a odešlou rámec k cílovému zařízení [22].

V následujícím výčtu jsou shrnuty dílčí vývojové fáze standardu:

- **MOST25** – původní návrh s možností synchronního i asynchronního přenosu s rychlostí 25 Mb/s. Šířka pásma byla navržena s ohledem na možnost přenášet nekomprimovaný zvuk nebo komprimované video. Zahrnuje kanál pro řízení přenosu o kapacitě 705 kb/s. Délka rámce je 512 bitů (viz obrázek 4.2).
- **MOST50** – zdvojnásobuje šířku pásma na 50 Mb/s. Délka rámce je navýšena na 1024 bitů. Na fyzické vrstvě lze kromě POF vláken použít i standardní vodiče s elektrickým signálem.
- **MOST150** – revize z roku 2007, délka rámce je 3072 bitů, přenosová rychlost 150 Mb/s. Podporuje začlenění Ethernetu a tvorbu multiplexu z různých signálů (audio, video, data,...). Připraveno na přenos televize ve vysokém rozlišení.

MOST rámce mohou obsahovat jak synchronní, tak asynchronní druh dat. Časově závislé aplikace, jako kontinuální přenos zvuku a videa vyžaduje právě synchronní přenos, kdy jsou vysílač i přijímač vzájemně synchronizovány. Asynchronní přenos je určen pro IP pakety nebo konfigurační data.



Obr. 4.2: Struktura rámce MOST25.

Jak už bylo zmíněno, fyzická vrstva technologie MOST je tvořena POF vlákny. Mezi další komponenty patří optický vysílač, který je nejčastěji řešen jako optický převodník elektrického signálu, který je ještě před převodem vhodně kódován. Jako zdroj světla se používají LED diody červené barvy (vlnová délka 650 nm). Zařízení, která podporují MOST mají tyto komponenty většinou již zahrnuté v sobě. Vzhledem ke krátkým vzdálenostem pro požadovaný přenos se používají standardní SI-POF vlákna, která mohou být doplněna o druhý plášť, který ochrání vlákna před

tepelným a mechanickým poškozením. Dalším druhem vlákna je tzv. CMT-POF, což je vlákno které má další vrstvu ve které je elektrický vodič pro napájení zařízení na konci kabelu. Konkrétní parametry komponent lze nalézt např. v literatuře [7].

4.1.2 Standard D2B

D2B (Domestic Digital Bus) lze považovat za předchůdce standardu MOST. Podobně jako MOST, má D2B kruhovou topologii do které lze připojit nejrůznější multimediální zařízení, nicméně kvůli poměrně nízké přenosové rychlosti 5,65 Mb/s se již nehodí pro přenos videa ve vysokém rozlišení. V rámci sběrnice se doporučuje vlákno o max. útlumu 400 dB/km, přičemž výstupní výkon LED diody je -15 dBm a dosah přenosu 8 metrů. Používá se speciální konektor s gelem pro snížení útlumu.

4.1.3 IEEE 1394

IEEE 1394 standard pro rychlou sériovou sběrnici u počítačového hardwaru, kde se často používá název FireWire. Standard není určen čistě jen pro automobilový průmysl, ale částečně definuje i různé parametry optického přenosu s POF vlákny. IEEE 1394a (FireWire 400) je sběrnice se šesti vodiči a pracuje s přenosovou rychlostí 400 Mb/s. Novější standard IEEE 1394b (FireWire 800), který navyšuje rychlost přenosu na 800 Mb/s, je uvažován jako nástupce standardů MOST. Nejnovější IEEE 1394c-2006 (FireWire S800T), popř. FireWire S1600 a S3200 z roku 2007 zatím POF vlákna na fyzické nemají definovány. Do automobilového průmyslu se přenesl standard pod názvem IDB-1394 – Customer Convenience Port [24].

4.1.4 Ostatní technologie

- **ByteFlight** – technologie společnosti BWM, vyvinutá speciálně pro řízení a sběr dat ze senzorů a čidel ve vozidlech, popř. elektronické ovládání komponent. ByteFlight operuje s rychlostí přenosu 10 Mb/s, přičemž obsahuje pokročilé metody pro spolehlivý přenos dat.
- **CAN** (Controller Domestic Bus)
- **SERCOS** (Serial Realtime Communication System)
- **PROFIBUS** (Process Field Bus) – viz kapitola 4.3.
- **INTERBUS** – standard pro automatizaci a senzorovou techniku.

4.2 Letecký průmysl

Základní požadavky leteckého průmyslu na přenosová média vycházejí z požadavků automobilového průmyslu, již zmíněných v 4.1. V konečném důsledku jsou ale po-

tencionální nároky na POF vlákna ještě vyšší:

- velký důraz na spolehlivost, redundance přenosových cest
- snížení váhy kabelů a komponent v co největší míře
- vysoká odolnost vůči vibracím
- teplotní odolnost od -60 do 130 °C
- protipožární opatření

U méně kritických aplikací, jako jsou multimediální a datové služby se stále využívá metalických přenosových médií. POF vlákna mohou nahradit metalické kabely především v této oblasti, hlavně při uvážení standardu MOST (viz 4.1.1).

V současné době jsou běžně instalována optická vlákna na bázi křemíku do letadel, právě kvůli příznivým vlastnostem. Své uplatnění nachází především v oblasti propojení řídicích a senzorických systémů, kde je důležitá právě spolehlivost a odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Vlákna POF mohou v budoucnu doplnit či nahradit stávající skleněná vlákna v oblasti leteckého průmyslu za předpokladu, že budou zkoumány vlivy klimatických jevů. Především pak dlouhodobý vliv extrémně nízké nebo extrémně vysoké teploty (viz výše) na stálost přenosových a mechanických parametrů.

4.3 Průmyslové sítě

V moderních průmyslových provozech je nezbytné zajistit přenos mezi výrobní mechanizací a řídicími prvky. Nejčastěji se jedná o senzorické nebo řídicí a monitorovací druhy dat. Průmyslové sítě ve většině případů vychází z lokálních počítačových sítí, přičemž jsou doplněny o potřeby řízení v reálném čase a zabezpečení vůči chybám při přenosu. Existuje mnoho standardů a protokolů které definují parametry průmyslových sběrnic. Nejznámější jsou: SERCOS, INTERBUS, PROFIBUS, průmyslový Ethernet [18].

Vlákna POF mají potenciál vstoupit do této oblasti za účelem úplné náhrady metalického vedení. Většina výrobních provozů totiž požaduje omezení nebo vyloučení vlivu elektromagnetického rušení které často vzniká vlivem průmyslových zařízení (motory a jiné výkonové stroje) nebo souběhem datových tras s těmi které vedou silovou elektřinu. Možnosti odstínění metalického vedení by bylo komplikované, nebo příliš drahé.

POF řeší fyzickou vrstvu průmyslových sběrnic: typ a rozměry kabelu, konektory a zakončení vlákna v zařízeních. Vlákna mají zesílený plášť na 2,2 až 6 mm z důvodů mechanické ochrany. Jádru zpravidla nepřesahuje standardní 1 mm. Teplotní odolnost je v rozmezí přibližně -40 až 70 °C. Podstatným parametrem, vzhledem k plánovanému použití je tzv. pevnost v tahu, tedy povolené namáhání vlákna vzhle-

dem ke změně přenosových vlastností. POF uvedená v [19] mají nárůst útlumu od 1 dB při vyvinuté síle do 80 N. Většina průmyslových řešení má vlastní specifické konektory. Nejčastěji se lze setkat s řešením pomocí LC konektorů, které jsou běžně dostupné pro vlákna na bázi skla, dále pak s bezkonektorovým řešením OptoLock, popř. RedLink Connector a Versatile Link. Síťová zařízení pro průmyslové sítě které jsou dostupné pro připojení k POF jsou běžně velmi podobná těm pro metalické vedení. Např. u tzv. průmyslového Ethernetu jsou prvky doplněny o převod z elektrického na signál optický a vhodný konektor. Vyšší vrstvy přenosu zůstávají zachovány. Ukázka zařízení pro Ethernet v průmyslu je dostupná v [3], pod označením *Ethernet Over Plastic Optical Fibre* se vyrábějí převodníky, přepínače a většinou v kovovém provedení a zesílenou konstrukcí.

Kromě funkce přenosového média pro datové sběrnice lze POF využít jako optovláknový snímač nebo senzor, podobně jako je tomu u skleněných vláken. Veličin, které lze měřit optickým vláknem je celá řada: napětí a tlak v materiálu, vibrace, vzdálenost, teplota a nebo hladina kapalin. Vláknem zde funguje přímo jako detektor veličiny, není použito dalších elektrických přístrojů. Optické senzory jsou podrobněji popsány v kapitole 5.7.

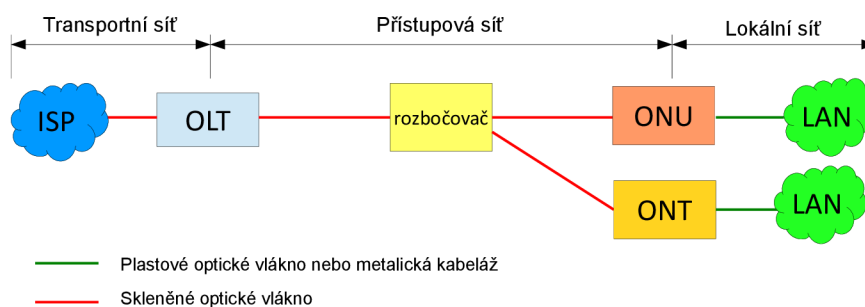
4.4 Počítačové sítě

4.4.1 Optická přístupová síť

Vlákna POF vykazují vysoký měrný útlum, proto je nelze nasadit na dlouhé přenosové trasy v řádku jednotek či desítek kilometrů. Z tohoto důvodu je potřeba stávajících optických vláken na bázi skla k překlenutí nejdelších úseků přístupové sítě. Hlavním polem využití výhod POF vláken bude oblast posledních několika metrů které se nacházejí na přechodu mezi přístupovou sítí provozovatele a lokální sítí zákazníka. Obecné schéma uvažovaného návrhu je na obrázku 4.3.

- Optické linkové zakončení (OLT). Prvek je umístěn v centrále operátora (Central Office, CO) a poskytuje propojení mezi transportní (páteřní) a přístupovou sítí. Síť operátora realizuje služby přístupu k Internetu, internetové telefonii a internetové televizi.
- Pomocí optického vlákna je jeden nebo více rozbočovačů připojeno k CO. Je použita jedna z variant distribuce optického signálu, metodou aktivní optické sítě (AON) nebo stále častější pasivní optické sítě (PON).
- Rozvaděč je prvek ve kterém dochází k dělení optického paprsku. V případě architektury PON buď následuje přímo vlákno k jednotce ONU popř. ONT a nebo následuje další, kaskádové dělení paprsku pomocí tzv. splitterů v určitém poměru 1:n, kde n je počet výstupů ze splitteru.

- V objektu koncového uživatele je umístěna jednotka ONU (Optical Network Unit) – optické síťové zakončení jednotkou, představující rozhraní mezi standardním skleněným vláknem a POF popř. metalickým vedením. Druhou možností je jednotka ONT (Optical Network Termination) – optické síťové zakončení koncovým zařízením poskytující služby (např. VoIP, IPTV).



Obr. 4.3: Návrh přístupové sítě s využitím skleněných a POF vláken.

4.4.2 Varianta FTTH

FTTH (Fibre to the Home) je nejdiskutovanější koncepcí současnosti z hlediska běžného koncového uživatele. Jde o ideální řešení moderních přístupových sítí s dostatečnými parametry pro moderní přenosové požadavky. Optické vlákno je ukončeno v objektu majitele domu, kde je nainstalován optický konvertor na který navazuje lokální síť zákazníka. V současné době tomuto segmentu dominuje metalická kabeláž, nicméně vlákna POF zde mohou postupně zaujmout důležité místo.

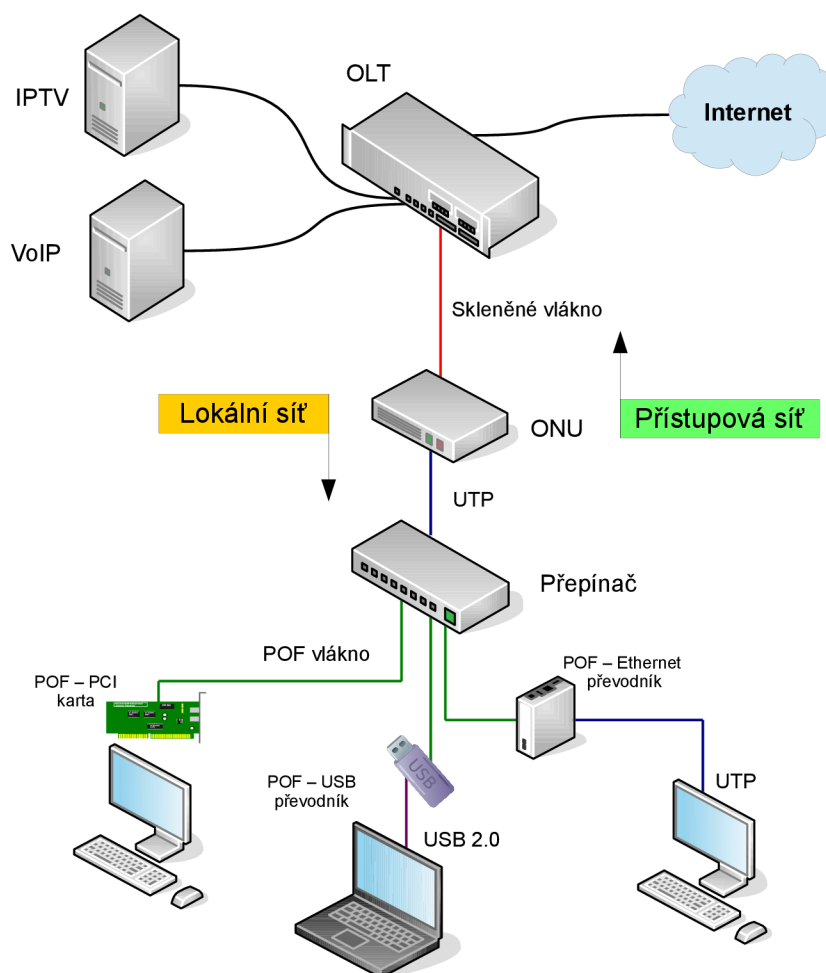
Z hlediska nasazení POF vláken je klíčové rozhraní přístupové a lokální sítě, kde může docházet k efektu úzkého hrdla. Tuto situaci lze reálně do budoucna předpokládat. Zejména trend v poskytování televizního vysílání po IP sítích (IPTV), kdy jeden televizní kanál ve vysokém rozlišení (HD) vyžaduje datový tok až 20 Mb/s. Pokud uvažujeme sledování více kanálů více uživateli současně, požadovaná přenosová rychlost lehce překročí hodnotu 100 Mb/s. Nejběžněji se lze setkat s řešením, které pomocí POF vláken nabízí právě 100 Mb/s na vzdálenost 50 nebo 100 metrů na jeden segment sítě, což je vzhledem k výše popsánému problému [21].

Toto může být rozhodující argument při rozhodování mezi POF vlákny a klasickou měděnou kabeláží, která je v současnosti daleko dostupnější a za nižší náklady běžně poskytuje až 1 Gb/s pro místní síť (LAN).

S přihlédnutím k předchozímu je potřeba brát v potaz i další problém. V současné době je na trhu poměrně malá nabídka síťových prvků pro vlákna POF, které by vyhovovaly různým druhům situací při budování sítě. To s sebou nese nutnost používat dodatečná zařízení, která zajistí převod mezi optickým a elektrickým signálem. Z tohoto důvodu nelze nyní budovat přístupové a lokální sítě čistě na bázi POF vláken.

Pro koncept FTTH by bylo nejvhodnější mít na straně zákazníka jediné zařízení, které spojuje funkce optické zakončovací jednotky, POF přepínače, směrovače a bezdrátového bodu.

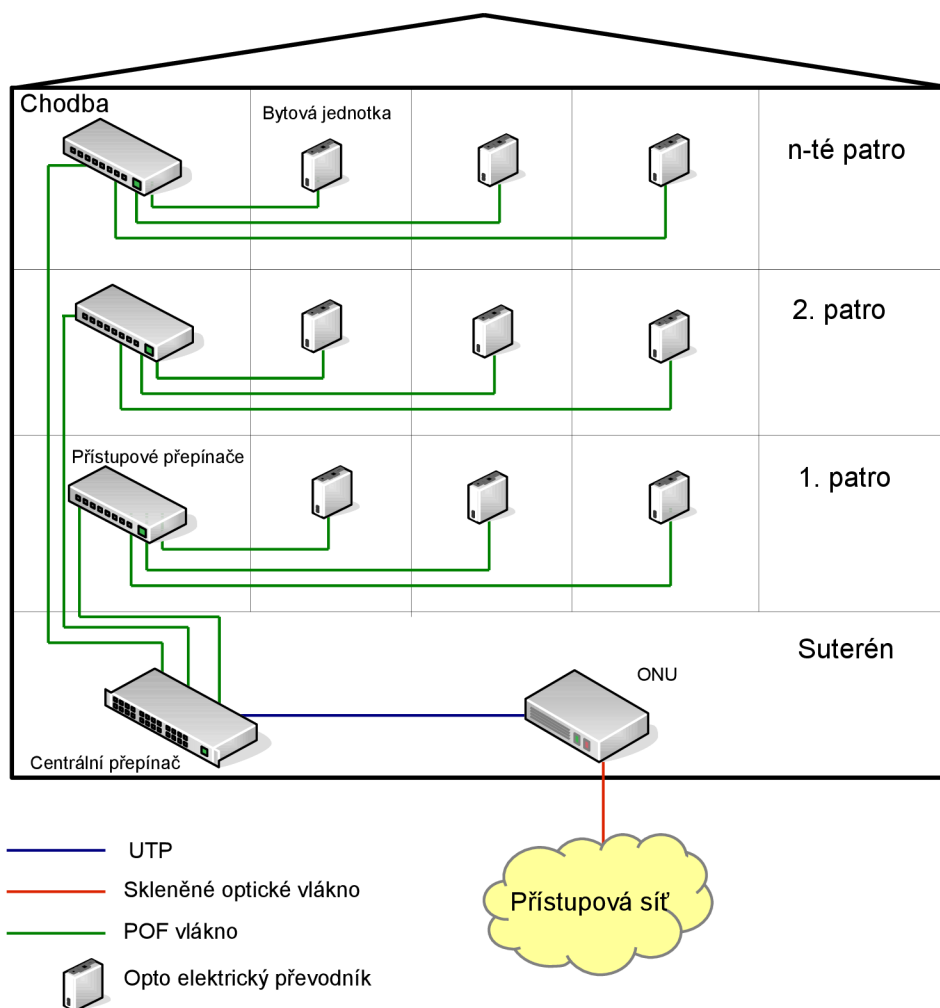
Uvažované schéma sítě FTTH využívající POF vlákna na rozhraní přístupové a lokální sítě zobrazuje obrázek 4.4.



Obr. 4.4: Síť FTTH s využitím POF vláken v lokální síti.

4.4.3 Varianta FTTB

FTTB (Fibre to the Building) je v současnosti populární koncept přístupové sítě u bytových a vícepodlažních objektů. Vlákno je z venkovní infrastruktury přivedeno do jednotky ONU v budově a společně se směrovačem tvoří hraniční bod lokální sítě. Centrální přepínač je umístěn blízko jednotky ONU a je vybaven funkcemi jako VLAN nebo QoS. Vlákna POF zde představují ideální oblast využití, jelikož mohou nahradit strukturovanou kabeláž ve vertikálních rozvodech do jednotlivých pater budovy (viz schéma 4.5). U FTTB je více segmentů sítě a tím i delší vzdálenosti k centrálnímu bodu sítě. Ve většině případů se jedná o topologii typu hvězda. V případě většího objektu je lokální síť rozdělena na distribuční a přístupovou vrstvu. Současným problémem je vhodné zakončení u zákazníka. Řešení jsou různá, nicméně předpokládáme, že zákazník má již v bytě strukturovanou kabeláž, pak je nejjednodušší dodat optoelektrický převodník.



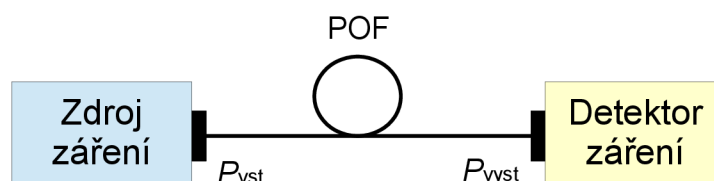
Obr. 4.5: Síť FTTB s využitím POF vláken v lokální síti.

5 MĚŘENÍ PARAMETRŮ POF

5.1 Měření útlumu

Měření útlumu patří k základním parametrům přenosu po optickém vlákně. Jeho definice byla již zmíněna na začátku této práce, v podkapitole 1.4.1. V případě samotného vlákna je nejdůležitější tzv. měrný útlum, tedy hodnota útlumu v dB na jednotku délky (dB/km nebo dB/m). Dále je možné měřit útlum spojů a konektorů, umístěných na přenosové trase. To je důležité z hlediska výsledné celkové útlumové bilance trasy.

K měření útlumu je potřeba vhodný zdroj záření, měřený prvek a vhodný detektor záření. Schéma zapojení je na obrázku 5.1. Na detektoru je odečítána hodnota optického výkonu a ten je následně porovnán s referenční hodnotou výkonu, což je hodnota kterou změříme například na velmi krátkém úseku vlákna. Při všech měření v kapitole 5 byl použit měřicí přístroj OPTOKON OFT-820-POF [23].



Obr. 5.1: Obecné schéma měření útlumu vlákna.

5.2 Dosah optického spoje

Obecně lze optickou přenosovou trasu (resp. optický spoj) popsat jako spojení typu bod-bod. Na obou stranách přenosu musí být zařízení, které je schopno měnit signál z elektrického na optický. Toto zařízení se nazývá optoelektrický převodník (nebo také media konvertor), který je obvykle vybaven jedním rozhraním pro přívod optického a jedno pro přívod elektrického signálu. Přenosová trasa je obvykle tvořena vícero prvky. Ty lze rozdělit na aktivní (převodníky, rozbočovače) a pasivní (optické vlákno, konektory, spojky). Za vložný útlum lze považovat vlastnost těchto prvků způsobit zeslabení optického signálu. Celkový vložný útlum je dán součtem dílčích útlumů na celé délce trasy.

Praktické měření bylo realizováno na dvou typech převodníků od společnosti OPTOKON:

- **CS-POF-OL2.** Jednoduchý převodník určený pro POF. Díky svým malým rozměrům a nízké váze je určen pro spotřebitelský segment, do lokálních sítí

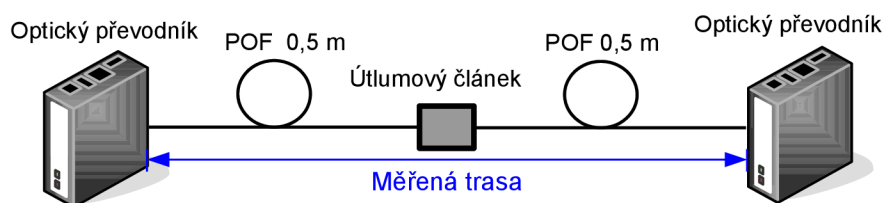
atp. Optické rozhraní je typu OptoLock® (viz strana 27) a elektrické je standardní konektor RJ-45 (resp. 8P8C) pro Fast Ethernet (standard 802.3u). Převodník vyžaduje externí napájení 5 V. Dosah převodníku není výrobcem specifikován [6].

- **CS-240-2.** Převodník s dvojicí nezávislých volitelných optických portů pro skleněná (LC, SC) nebo plastová vlákna (SMI, OptoLock®). Na obrázku 5.2 je varianta s porty OptoLock® označené jako FO1 a FO2. Metalická část nabízí dva porty RJ-45 (resp. 8P8C, označení LAN1 a LAN2) pro Fast Ethernet. Převodník vyžaduje externí napájení 5 V. Výrobcem udávaný dosah spoje pro vlákna POF je 50 metrů [5].



Obr. 5.2: Převodník OPTOKON CS-240-2.

Účelem měření bylo zjistit maximální překlenutelný útlum trasy. Pro tento účel byl mezi převodníky zařazen útlumový článek který umožňuje měnit hodnotu vloženého útlumu v rozmezí 0 až 30 dB. Délka obou POF vláken byla větší než 1 metr, lze tedy zanedbat jejich vložený útlum. Schéma zapojení je na obrázku 5.3, reálné zapojení optické trasy v laboratoři je na obrázku 5.4.



Obr. 5.3: Zapojení při měření vloženého útlumu.

Nejprve byla změřena úroveň výkonu na výstupu z převodníku. Následně byly převodníky propojeny POF vláknem a podle rozsvícení kontrolní diodou bylo ověřeno, že došlo k vzájemnému spojení přes optické porty. Následně byla trasa rozpojena a vložen útlumový článek. Postupně byla navyšována hodnota útlumu až k

hodnotě, kdy došlo k rozpojení spoje, což bylo signalizováno kontrolní diodou FX LINK na převodníku. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Výsledky měření optického spoje.

Optický převodník	CS-POF-OL2	CS-240-2
Výstupní výkon bez útlumového článku	-14,19 dBm	-10,92 dBm
Ztráta spojení nastala při útlumu (A_{21} , A_{22})	7 dB	14 dB
Výst. výkon s útlumovým článkem při 0 dB	-19,14 dBm	-15,74 dBm
Útlum samotného článku (A_1)	4,95 dB	4,82 dB
Měrný útlum vlákna	0,25 dB/m	0,25 dB/m
Výst. výkon s útlumovým článkem při 7/14 dB	-25,96 dBm	-30,11 dBm
Celkový překlenutý vložný útlum	12 dB	19 dB
Vypočítaný dosah spoje (L_1 , L_2)	48 m	76 m

Optický převodník CS-240-2 má přibližně o 3 dB vyšší vyzařovací výkon a zřejmě i citlivější přijímací fotodiodu oproti CS-POF-OL2. Pro kontrolu byl změřen výstupní výkon převodníků při nastaveném vložném útlumu 0 dB a následně pro hodnotu kdy byl spoj přerušen (7, resp, 14 dB). Porovnáním těchto hodnot dojdeme k závěru, samotné zařazení útlumového článku do trasy způsobí ztrátu signálu zhruba 5 dB. Pravděpodobnou příčinou bylo nedokonalé nasměrování středů konců vláken v přípravku. Průměr místa přichycení vlákna byl o několik milimetrů větší, než vlákno samotné. Pokud uvažíme průměrný útlum POF vlákna 0,20 dB/m, tak vložný útlum 5 dB představuje zkrácení přenosové trasy přibližně o 25 metrů. Měrný útlum měřeného vlákna byl zjištěn experimentálně a vícekrát. Výsledek byl poté zprůměrován a zaokrouhlen.



Obr. 5.4: Dvojice převodníků OPTOKON CS-240-2 v zapojení s útlumovým článkem.

Dosah spoje mezi převodníky, L_1 pro CS-POF-OL2 a L_2 pro CS-240-2, lze stanovit jako podíl celkového útlumu spoje a měrného útlumu optického vlákna α .

Celkový útlum je dán součtem jednotlivých vložných ztrát spoje. Při měření byly tyto ztráty simulovány umělým navyšováním hodnoty útlumu na útlumovém článku. Ve výsledky je tedy celkový vložný útlum měřené trasy dán: ztrátou signálu způsobenou vlastním útlumovým článkem A_1 (změřená hodnota zaokrouhlena na 5 dB) a maximálním nastaveným útlumem A_{21} (CS-POF-OL2) resp. A_{22} (CS-240-2), při kterém došlo k přerušení spojení optické trasy.

Výpočet maximálního dosahu spoje L_1 mezi dvojicí převodníků CS-POF-OL2:

$$L_1 = \frac{A_1 + A_{21}}{\alpha} = \frac{5 + 7}{0,25} = 48 \text{ m.} \quad (5.1)$$

Obdobně L_2 pro převodníky CS-240-2:

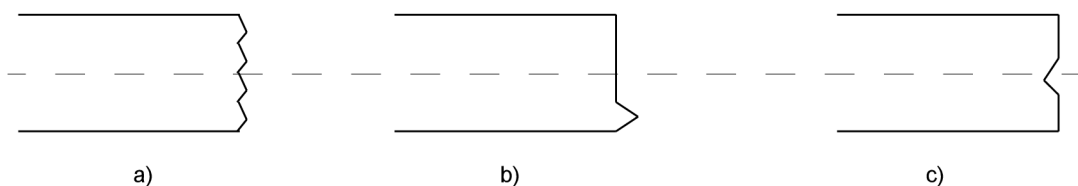
$$L_2 = \frac{A_1 + A_{22}}{\alpha} = \frac{5 + 14}{0,25} = 76 \text{ m.} \quad (5.2)$$

Jak již bylo zmíněno dříve, převodník CS-240-2 má mít podle výrobce schopnost fungovat na 50 metrech připojeného POF. Při reálném zapojení bylo dosaženo hodnoty útlumu, která odpovídá dosahu 76 metrů. Při této hodnotě převodníky na obou koncích ještě dokázali detekovat spojení. Z toho lze vyvodit, že výrobce uvádí dosah 50 metrů jako minimální garantovaný. Naopak u převodníku CS-POF-OL2 není v dostupné dokumentaci údaj do dosahu vůbec uveden. Doporučený typ POF není výrobcem převodníků specifikován z žádného z převodníků. Pouze u CS-240-2 jsou v dokumentaci uvedeny rozměry jádro/plášť 980/1000 μm .

5.3 Kvalita konce vlákna

Další typ vložného útlumu vzniká při přechodu paprsků do nebo z vlákna, přičemž hodnota útlumu je závislá na povrchu čela vlákna. Nesprávně upravený konec vlákna zahrnuje především nehomogenity a mechanické poškození čela vlákna, kdy je např. odštípnuta část čela, nebo je naopak vyštípnuta (viz obrázek 5.5), popř. kombinace předchozího. Následně dochází k rozbíhání paprsků, popř. se část paprsků láme mimo původní trasu. Důsledkem je ve výsledku slabší signál na detektoru záření v přijímači nebo malý navázaný výkon světla z vysílače.

Při tomto měření byly vybrány čtyři nástroje vhodné pro úpravu povrchu (zalomení) konce vlákna. Vzhledem k tomu, že bylo potřeba nejprve změřit referenční hodnotu výkonu, aby bylo možné poté nástroje porovnat, bylo vlákno o délce 1 metr a průměru 1 mm zalomeno speciálním nástrojem (viz obrázek 5.6), který dodává výrobce vláken a lze tak považovat tento nástroj jako nejvhodnější. Následně byl na konec vlákna použit některý z nástrojů uvedených v tabulce 5.2 a změřen výkon a útlum na detektoru záření.

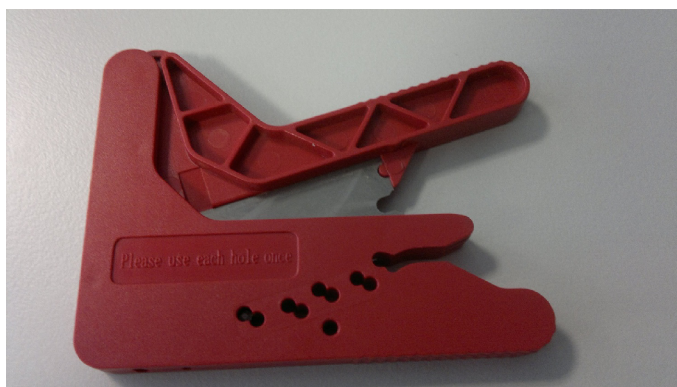


Obr. 5.5: Vady konce vlákna: a) nerovnosti, b) střešina v plášti, c) vyštípnutí jádra.

Tab. 5.2: Výsledky měření kvality zakončení vlákna pomocí nástrojů.

Nástroj	Optický výkon [dBm]	Útlum [dB]
Zalamovačka POF	-9,20	-
Nůžky na papír	-14,59	5,56
Kombinační kleště	-15,99	6,82
Žiletkový nůž	-11,77	2,63

Z výsledků měření lze vyvodit, že po speciální rezačce od výrobce POF je jako druhý nejvhodnější nástroj žiletkový nůž, který je v podstatě podobný rezačce, pouze se liší v konstrukci (umístění žiletky). Při použití další dvou nástrojů: nůžky na papír a kombinační kleště je nárůst útlumu znatelnější, než u žiletkového nože. Obecně lze tedy říci, že nejdůležitější je, aby bylo POF zakončeno (resp. zalomeno) tenkým nástrojem kolmo k čelu vlákna (resp. kolmo k ose středu jádra).



Obr. 5.6: Nástroj k zalomení konce POF vláken.

Kromě nástrojů bylo použito různého smirkového papíru k ověření vlivu broušení čelní plochy POF na útlum záření na konci vlákna. Broušení bylo provedeno na sedmi různých smirkových papírech od nejjemnějšího (600) po nejhrubší (60). Po každém použití smirkového papíru byl konec vlákna zalomen, byla naměřena referenční hodnota (průměrná hodnota všech měření -8 dBm, délka vlákna 1 m) a použit další smirkový papír s jinou jemností. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.3.

Tab. 5.3: Výsledky měření kvality broušení vlákna.

Hrubost [-]	Optický výkon [dBm]	Útlum [dB]
600	-8,48	0,97
400	-8,20	0,68
320	-9,21	1,48
180	-10,78	3,08
175	-9,90	2,20
100	-10,84	3,73
60	-9,77	2,65

Rozdíl nejjemnějšího a nejhrubšího broušení je přibližně 3 dB, nicméně nejvyšší útlum byl naměřen u jemnosti 180 (3,08 dB). Pokud použijeme výsledky z předchozí tabulky 5.2, kdy srovnáme nejlepší výsledky při zalomení vlákna pomocí speciálního nástroje („zalamovačka“ POF) s nejjemnějším broušením, tak dostaneme rozdíl v úrovni výkonu pouze 0,97 dB. Jemnějším broušením POF tak lze docílit jen malého zmírnění útlumu na konci vlákna. Naopak zdrsnění povrchu vneslo další útlum.

5.4 Spojování POF v praxi

Teorie kolem spojování polymerových vláken byla popsána již dříve, v kapitole 3.2. Tato část experimentální práce se zaměřuje na praktické možnosti spojování POF.

Mechanická spojka (obrázek 5.7) je v podstatě jediný v praxi používaný způsob spojování POF. Při měření byla konkrétně využita spojka pro bezkonektorový systém OptoLock®, který je blíže popsán v kapitole 3.2.2. Hlavní předností je jednoduchost použití. Optická spojka se skládá z dvou OptoLock®portů které jsou pevně spojeny k sobě. Hlavní funkcí je tedy pevně upevnit konce vláken v jedné rovině, co nejblíže k sobě.



Obr. 5.7: Optická spojka pro systém OptoLock.

K změření vložného útlumu spojky byla použita přímá metoda: nejprve byl na krátkém úseku vlákna (délky přibližně půl metru) změřen výstupní výkon a tato hodnota uložena jako referenční. Následně se vlákno v polovině přerušilo a na oba konce se nasadila optická spojka. Poté byl opět změřen výstupní výkon na detektoru.

Výsledný vložný útlum spojky byl po zopakování třech měření stanoven na 3 dB. Hodnota vložného útlumu je ovlivněna hlavně dvěma faktory:

- Kvalitou konce vlákna. Nekvalitně upravený konec vlákna navyšuje vložný útlum. Lze minimalizovat, podrobnosti viz kapitola 5.3.
- Útlumem vzniklým vzduchovou mezerou mezi konci vláken. Nelze odstranit.

Dále byly vyzkoušeny dvě experimentální metody spojování, které se zatím běžně v praxi nepoužívají:

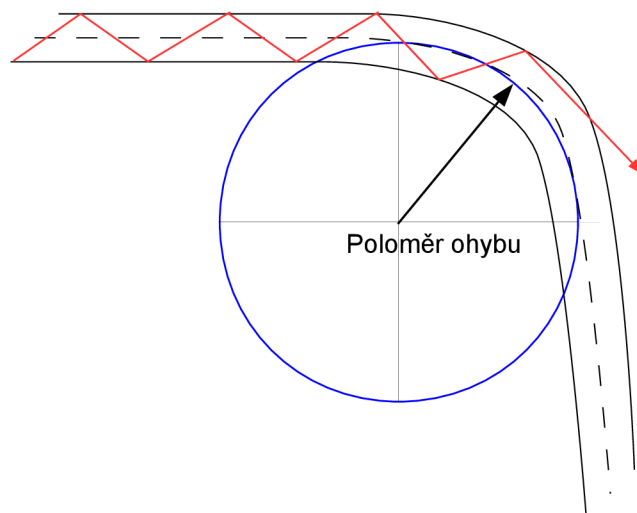
Spojování pomocí tepla, kdy se nahřáté konce vláken spojí. Tato metoda se ukázala jako nepoužitelná vzhledem k absenci podpůrných nástrojů, které by zajistili přesnost spojení a celkovou odolnost spoje. Se svařování POF se v současnosti vůbec neuvažuje a ani do budoucna se s ním z praktických důvodů nepočítá. Podobných výsledků bylo dosaženo při spojování rychlo tvrdnoucím lepidlem na bázi kyanoakrylátu. Spoj byl velmi křehký a útlum v desítkách dB. Z experimentálních pokusů a měření lze tedy vyvodit že spojování POF mechanickou spojkou je v současnosti dostačující a není potřeba vyvíjet jiných metod.

5.5 Vliv makro ohybů

Situace, kdy je optické vlákno ohýbáno je v praxi zcela běžná. Ohýbání vede ke vzniku makro ohybů. Hlavním parametrem je poloměr ohybu vyjádřený v jednotkách délky. Mezi ohýbáním vlákna a útlumem existuje nepřímá úměra: čím menší je poloměr ohybu, tím větší je vytvořený útlum. Ztráta optického signálu je způsobena tím, že v místě ohybu, není splněna podmínka úplného odkazu paprsku a část energie je vyzářena mimo jádro do pláště, kde je pohlcena. Situace je vyobrazena na obrázku 5.8, kde je červeně vyznačen paprsek který se láme do pláště, místo zpět do jádra.

Tento jev je při přenosu informací nežádoucí. Naopak některé optovláknové senzory využívají tohoto principu. Kromě makro existují i mikro ohyby, které jsou charakterizovány menším poloměrem než je poloměr vlákna samotného a vznikají např. při výrobě vlákna nebo působením okolního prostředí v optické trase.

Většina optických vláken lze ohýbat jen do určitého poloměru bez znatelného nárůstu útlumu. Minimální poloměr je většinou dán materiálem, ze kterého je vlákno vyrobeno a rozměry vlákna. Následující test měl za cíl otestovat rozdíly v citlivosti na makro ohyby mezi jednovidovým vláknem ITU-T G.657 a vícevidovým polymerním vláknem se skokovou změnou indexu lomu SI-POF.



Obr. 5.8: Vliv makro ohybů na šíření paprsku v optickém vlákně.

Motivací pro následující měření bylo, že POF vlákna by mohla najít uplatnění jako levnější a perspektivnější řešení v rámci poslední míle nebo distribučních rozvodů v bytových bytech v konceptu FTTB. Právě z toho důvodu se předpokládá existence ohybů na optické přenosové trase při instalaci optických vláken uvnitř budov.

5.5.1 Optické vlákno ITU-T G.657

Při budování optických přístupových sítí je potřeba řešit jaký druh optického vlákna je nejvhodnější. Současná vlákna odvozená od doporučení G.652 mají vyhovující přenosové parametry, ale ne už tak parametry mechanické. S nástupem technologií FTTx bylo potřeba speciálního vlákna, které bude vynikat v jiné oblasti než minimální útlum s disperze a to s ohledem na praxi, kdy má instalace optických vláken v přestupových sítí svoje specifika.

Mezinárodní telekomunikační unie (ITU) vytvořila nové doporučení pro optická vlákna přímo určená pro přístupové sítě technologie FTTx a to pod souhrnným označením G.657 [15]. Hlavní prioritou toto typu je redukovat ztráty signálu způsobené makro ohyby vlákna při zachování použitelnosti v pásmu vlnových délek 1260 až 1625 nm. Vychází se z předpokladu, že v přístupových sítích je pravděpodobnost makro ohybů vyšší, než u transportních a metropolitních sítí, kde se vyskytují především dlouhé úseky s velkým poloměrem ohybu.

Rozdělení je následující:

- Kategorie G.657.A je určena pro venkovní rozvody přístupové sítě FTTx. Je plně kompatibilní s typem G.652.D. Kategorie je rozdělena na dvě podkategorie:

- Podkategorie A1 – minimální poloměr ohybu je 10 mm.
- Podkategorie A2 – minimální poloměr ohybu je 7,5 mm.
- Kategorie G.657.B je určena pro rozvody uvnitř objektu (technologie FTTB). Nemusí být plně kompatibilní s typem G.652.D.
 - Podkategorie B2 – minimální poloměr ohybu je 7,5 mm.
 - Podkategorie B3 – minimální poloměr ohybu je 5 mm.

Pro účely praktického měření bylo použito vlákno G.657.A1. Vybrané parametry jsou uvedeny v tabulce 5.4 [15].

Tab. 5.4: Mechanické parametry optického vlákna G.657.A1 dle doporučení ITU-T.

Poloměr ohybu [mm]	15	10
Počet otáček [-]	10	1
Max. útlum při $\lambda = 1550$ nm [dB]	0,25	0,75
Max. útlum při $\lambda = 1625$ nm [dB]	1	1,5

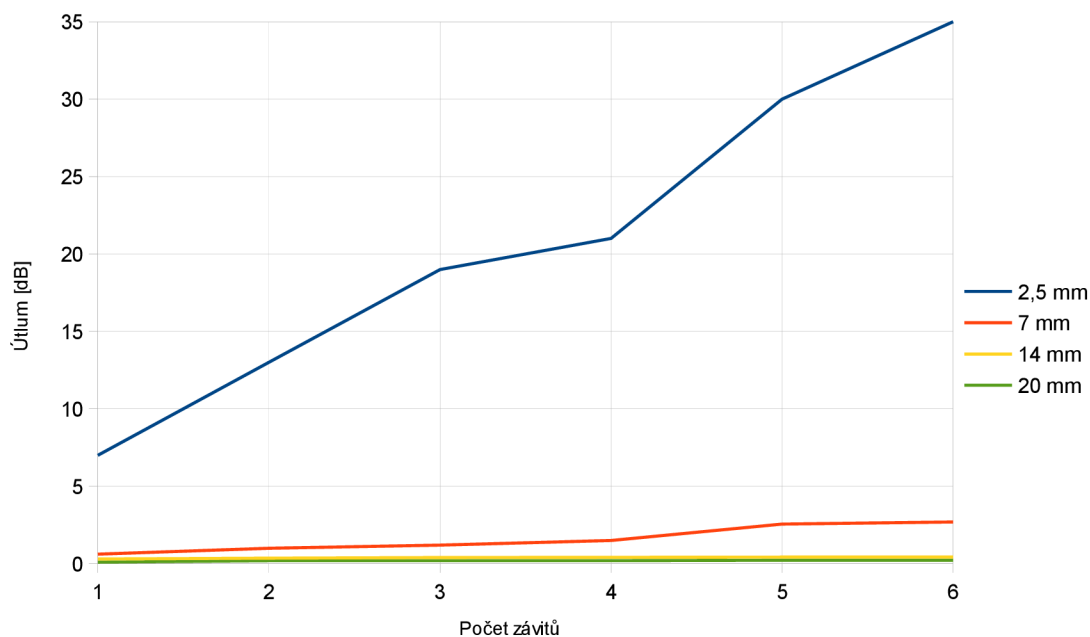
Metrový úsek vlákna G.657.A1 byl zbaven všech vrstev ochrany a pomocí svářečky spojen na obou koncích s patchkordy (délka přibližně půl metru) opatřenými LC konektory. Výsledný optický spoj byl zapojen mezi zdroj (Exfo FLS-600) a detektor (Exfo FPM-600). Použitá vlnová délka byla 1550 nm. Referenční hodnota optického výkonu na detektoru při volně položeném spoji byla 4,42 dBm. Útlum na svárech byl svářečkou odhadnut na hodnotu 0,04 dB.

Poté bylo měřené vlákno ohýbáno kolem čtyř válců s různými poloměry a různým počtem závitů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.5. Grafické znázornění průběhu je v grafu 5.9.

Tab. 5.5: Naměřené hodnoty při ohýbání vlákna G.657.A1.

Poloměr ohybu [mm]	Počet závitů a útlum [dB]					
	1	2	3	4	5	6
2,5	7	13	19	21	30	35
7	0,61	1,00	1,20	1,50	2,56	2,70
14	0,30	0,36	0,40	0,41	0,42	0,42
20	0,10	0,19	0,20	0,20	0,22	0,22

Norma ITU-T hovoří o maximálním útlumu 0,75 dB při jediném závitě o poloměru 10 mm. Dle naměřených hodnot mělo vlákno útlum 0,61 dB při poloměru ohybu 7 mm a 0,30 dB při poloměru ohybu 14 mm. Vlákno má očekávané parametry. Druhým údajem v doporučení ITU-T je útlum při deseti závitech a poloměru ohybu 15 mm. Během měření bylo provedeno jen šest závitů, protože při dalších závitech se již hodnota útlumu výrazněji neměnila. Pokud uvažujeme nejvyšší naměřený



Obr. 5.9: Graf závislosti útlumu na ohýbání a počtu závitů vlákna G.657.

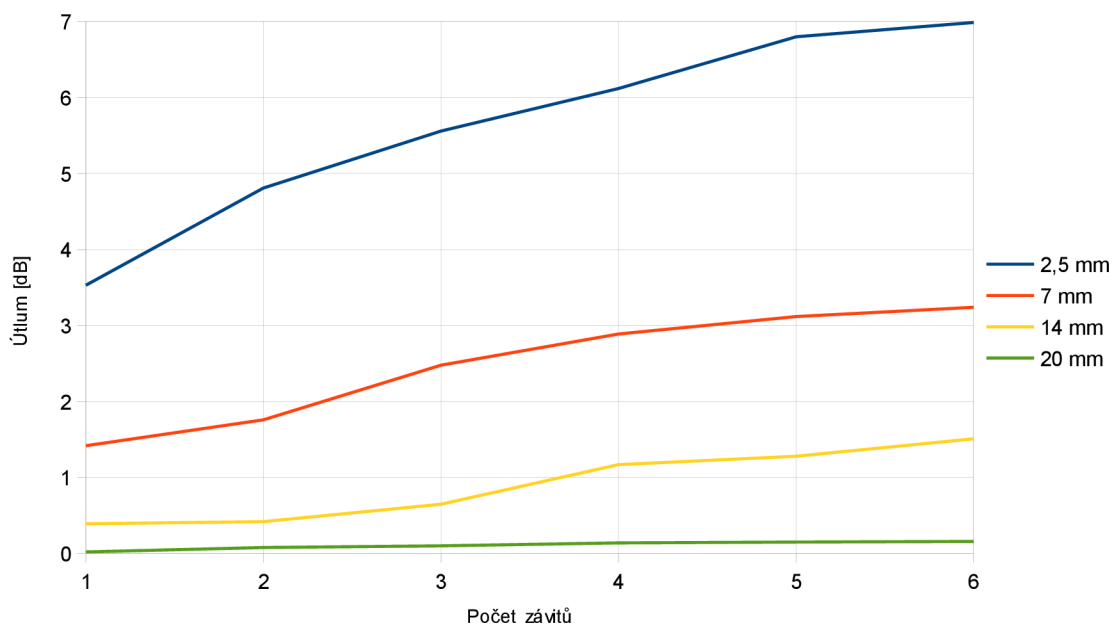
útlum 0,42 dB (při poloměru 14 mm), jde tak o téměř dvojnásobek vzhledem k hodnotě v doporučení ITU-T, která činí 0,25 dB. Možné vysvětlení je takové, že během měření bylo nutné vlákno namáhat i silově, aby byl vytvořená závit o požadovaném poloměru.

5.5.2 Optické vlákno SI-POF

Následně bylo měření provedeno s SI-POF vláknem o celkové délce jeden metr. Průběh měření byl obdobný: jako zdroj i detektor záření sloužil měřící přístroj OPTOKON OFT-820. Vlnová délka zdroje byla 650 nm, referenční úroveň signálu na detektoru byla $-8,44$ dBm. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.6, graf je vykreslen na obrázku 5.10.

Tab. 5.6: Naměřené hodnoty při ohýbání vlákna SI-POF.

Poloměr ohybu [mm]	Počet závitů a útlum [dB]					
	1	2	3	4	5	6
2,5	3,53	4,81	5,56	6,12	6,80	6,99
7	1,42	1,76	2,48	2,89	3,12	3,24
14	0,39	0,42	0,65	1,17	1,28	1,51
20	0,02	0,08	0,10	0,14	0,15	0,16



Obr. 5.10: Graf závislosti útlumu na ohýbání a počtu závitů vlákna SI-POF.

U měřeného SI-POF vlákna bylo dáno výrobcem, že při ohybu s poloměrem 25 mm je maximální útlum 0,5 dB [13]. Dle měření vlákno vykazovalo útlum pouze 0,02 dB, lze tedy odvodit, že výrobcem udávaná hodnota je nejzazší možná s velkou tolerancí, např. při výrobě.

5.5.3 Výsledky srovnání

Podle výsledků měření uvedených v kapitolách 5.5.1 a 5.5.2 lze vyvodit jisté rozdíly mezi oběma druhy vláken. V případě vlákna G.657 již jediný závit s poloměrem ohybu způsobí útlum 7 dB, což lze považovat za nepříjemně vysokou hodnotu, přičemž další závity způsobují prudký nárůst, kdy při šesti závitech je vytvořený útlum 35 dB, což v podstatě znemožňuje komunikaci na trase.

SI-POF vlákno při jediném závitě a stejném poloměru vykazuje útlum 3,53 dB, což lze vzhledem k daleko většímu útlumu na jednotku délky považovat ještě za hodnotu, která neovlivní zásadně dosah spoje. Při zvyšujícím se počtu závitů stoupá útlum podstatně méně, než u vlákna G.657. Ku příkladu testované SI-POF vlákno má při šesti závitech vložný útlum 6,99 dB, což je přibližně dvojnásobek oproti jedinému závitě.

Oba dva typy vláken se v případě hodnoty poloměru ohybu 7 mm chovají přibližně stejně, přičemž vlákno G.657 vykazuje o 0,82 dB menší útlum při jediném závitě. Při dalších závitech je u obou vláken nárůst útlumu pozvolný a prakticky

se nemění od hodnoty šesti závitů. Nicméně, útlum stále není možné považovat za zanedbatelný a je nutné se takovému poloměru ohybu vyhnout.

Poslední dva poloměry, tedy 14 a 20 mm i při několika současně provedených závitech nevytvoří větší útlum než 0,22 dB (vlákno G.657) a 0,16 dB (vlákno SI-POF). Pokud by tento druh makro ohybu byl ojedinělý na celé přenosové trase, lze při relativně krátké vzdálenosti trasy, takto vytvořený vložný útlum zanedbat.

5.6 Teplotní závislost

Praktické měření popsané v této kapitole mělo za cíl otestovat změnu vlastností POF vlákna při změně okolní teploty. Motivací tohoto měření byl fakt, že se polymerová vlákna běžně využívají v průmyslových odvětvích, kde se lze setkat s extrémními hodnotami kladných i záporných teplot. Kromě tedy již dříve popsané mechanické odolnosti je vyžadována i odolnost teplotní. Hlavním sledovaným parametrem je změna útlumu signálu při zvyšování nebo snižování okolní teploty. Sekundárním jevem při pozorování je případná deformace vlákna vlivem teploty a přibližné stanovení teploty tání materiálu.

Teplota tání je určena materiálem. POF vlákna jsou nejčastěji vyrobena z těchto materiálů:

- **Polymethylmethakrylát** typ polymeru, ze kterého je vyrobeno samotné vlákno, tedy jádro a plášť. Triviální název je plexisklo, dalším pojmenováním je akrylátové sklo. Jedná se o velice rozšířený polymer, který je používán pro své výhodné vlastnosti, jako je nízká váha, snadná tvarovatelnost při nahřívání a následná odolnost vůči povětrnostním vlivům. Výroby je relativně jednoduchá a levná. Teplota tání je přibližně 160 °C, přesná hodnota záleží na výrobním procesu a struktuře polymeru [20].
- **Polytetrafluorethylen** se používá při výrobě ochranné vrstvy vlákna, která má obvykle tloušťku přibližně 2 mm . Jde o fluorovaný polymer, známý jako teflon. Teplota tání je 200 až 300 °C. U polytetrafluorethylenu který je určen pro přímé a dlouhodobé působení vysokých teplot může být teplota tání i vyšší. Lze tedy uvažovat, že pro speciální POF, který by měly být např. ohni odolné lze polytetrafluorethylen doporučit jako přídatnou ochranou vrstvu.

5.6.1 Kladné teploty

Experiment probíhal v termokomoře firmy Vötsch, typové označení VC3 7018 (viz fotografie 5.11). Podstatou experimentu bylo postupné navyšování teploty z počátečních 20 °C až ke konečným 115 °C. POF vlákno o přibližné délce 5 metrů bylo

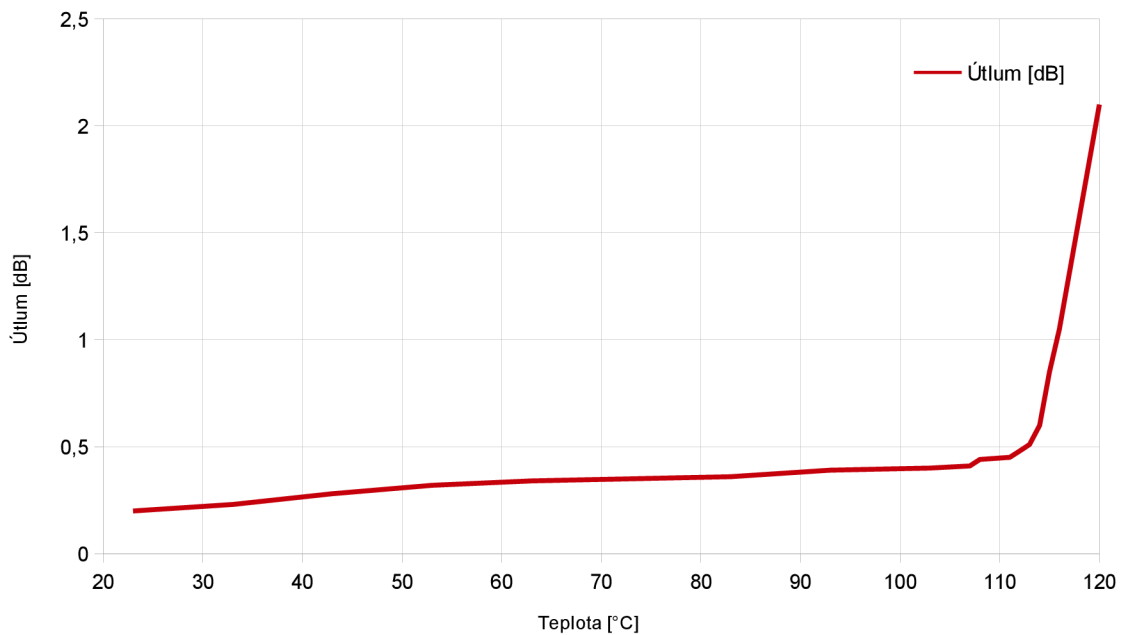
umístěno doprostřed komory na pevnou podložku a vyvedeno přes tepelnou průchodku ven kde bylo připojeno ke zdroji a detektoru záření. Zdroj byl nastaven na vlnovou délku 650 nm a referenční hodnota výkonu před započítáním měření byla stanovena na $-9,58$ dBm na detektoru. Vláknó bylo zkontrolováno kvůli možnému mechanickému poškození a konce upraveny nástrojem k tomu určeným. Měření probíhalo přibližně dvě a půl hodiny.



Obr. 5.11: Termokomora během měření.

Průběžně byla zapisována teplota a čas od začátku experimentu, kdy byla dosažena. Na měřícím přístroji byl odečítán útlum stanovený od referenční hodnoty (uvedena dříve) a hodnota výkonu na detektoru v dBm. Vybrané hodnoty z měření lze nalézt v tabulce 5.7. Z naměřených hodnot je na obrázku 5.12 vykreslen průběh.

Měření útlumu začalo při počáteční teplotě 23 °C, kdy útlum dosahoval $0,20$ dB, to je v běžných podmínkách zanedbatelná hodnota. O něco znatelnější nárůst útlumu začíná při teplotě 50 °C ($0,30$ dB, 42 min. od začátku) a až k teplotě 100 °C se mění jen nepatrně ($0,39$ dB, 120 min. od začátku). Při teplotě 108 °C začalo docházet k postupnému měknutí materiálů vlákna. To se projevilo táním pevné ochranné vrstvy vlákna a viditelnou deformací. Při 115 °C došlo k roztavení ochranné vrstvy, jádra i pláště a prudkému navýšení útlumu na 2 dB. V tento moment POF vlákno ztratilo svoje původní materiálové a mechanické vlastnosti a další navyšování teploty



Obr. 5.12: Graf závislosti útlumu na zvyšování teploty do kladných hodnot.

Tab. 5.7: Vybrané hodnoty z měření kladné teploty.

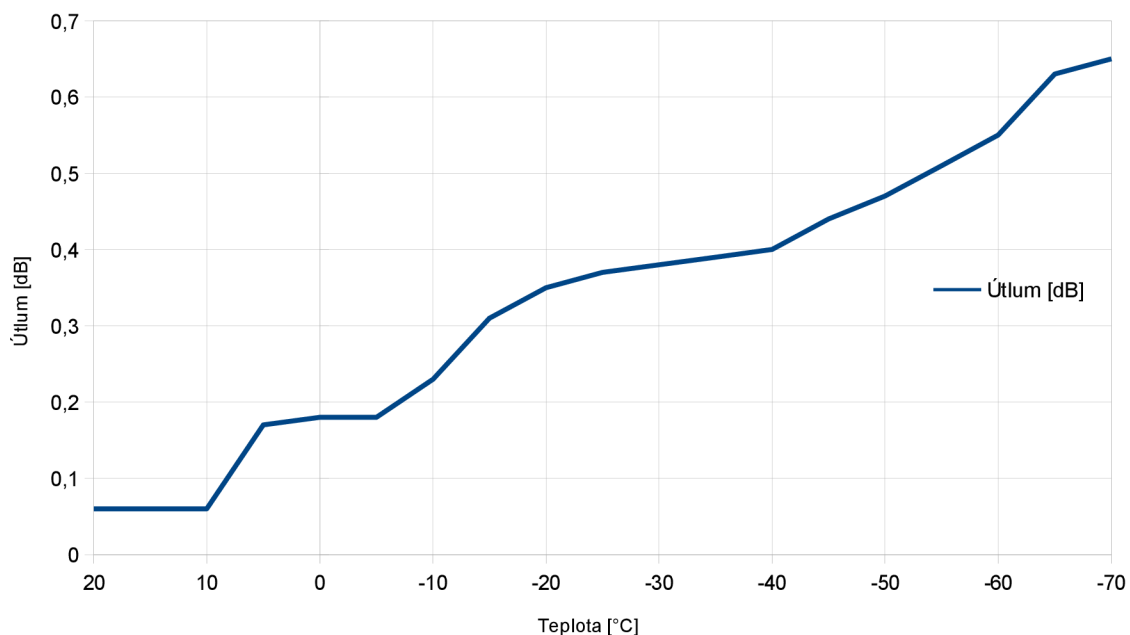
Čas [min.]	Útlum [dB]	Teplota [°C]
1	0,20	23
30	0,26	42
60	0,34	62
90	0,36	80
120	0,39	100
121	2,21	115

bylo ukončeno. Teplem zdeformované vlákno bylo po vyndání z termokomory zkontrolováno a bylo pozorováno silné porušení symetrie. Takto poškozené vlákno nelze považovat za provozuschopné. Výrobce ve svém dokumentu [13] uvádí maximální provozní teplotu 70 °C. Z výsledků měření lze vyvodit, že hodnota přibližně 100 °C je ještě bezpečná a vlákno lze provozovat.

5.6.2 Záporné teploty

Dále byl testován vliv teplot od 20 °C do –70 °C. Metodický postup byl stejný jako při měření kladných teplot (kap. 5.6.1). Nový vzorek vlákna o délce 20 metrů byl před začátkem zkontrolován a umístěn do termokomory. Referenční hodnota záření na detektoru před započítáním měření byla stanovena na –14,32 dBm při vlnové délce

650 nm. Počáteční teplota byla 21 °C a útlum 0,06 dB. Po 40 minutách byla dosažena teplota 0 °C a útlum 0,17 dB. Další navyšování útlumu bylo velmi pozvolné, přibližně 0,1 dB každých –10 °C (viz průběh na obrázku 5.13 a vybrané hodnoty z měření v tabulce 5.8). Po 176 minutách byla dosažena teplota –50 °C která je uváděna výrobcem jako minimální pracovní teplota [13]. Snižování teploty pokračovalo až ke konečným –70 °C, které bylo možné maximálně dosáhnout v termokomoře. Při této teplotě dosáhl útlum 0,61 dB.



Obr. 5.13: Graf závislosti útlumu na snižování teploty do záporných hodnot.

Tab. 5.8: Vybrané hodnoty z měření záporné teploty.

Čas [min.]	Útlum [dB]	Teplota [°C]
1	0,06	21
30	0,18	3,7
60	0,20	–7,5
90	0,34	–18,9
120	0,38	–30,6
150	0,40	–37,6
180	0,49	–52,4
210	0,60	–63,
234	0,61	–63,

Z výsledků lze vyvodit velmi dobrou odolnost polymerových vláken vůči velmi nízké teplotě okolí. Přenosové vlastnosti se po ochlazení měnily jen nepatrně. Lze předpokládat, že další snižování teploty by vedlo k dalšímu, nicméně pomalému nárůstu útlumu. V případě mechanického namáhání vlákna při velmi nízkých teplotách je možnost narušení ochranné vrstvy. Při použití POF ve venkovních rozvodech (např. v zemi) bude potřeba zajistit dodatečnou ochranu před vnějšími klimatickými vlivy.

5.7 Optovláknový senzor

Optovláknové senzory mohou využívat optického vlákna dvěma způsoby. Prvním z nich je, že vlákno přenáší informaci z externího senzoru. Druhý způsob je, že samo vlákno slouží jako detektor určitého jevu. Nejčastěji jde o senzor fyzikálních veličin jako je např. teplota, mechanické napětí, deformace, tlak, posuv popř. vibrace.

Základní princip optovláknového senzoru je, že se do vlákna naváže paprsek světla ze zdroje. Tento paprsek se šíří vláknem až do místa, kde je ovlivněn jevem pocházejícím z okolního prostřední vlákna. Na tomto místě dojde k rozptylu a část energie se odrazí zpět směrem ke zdroji světla. U zdroje záření je pak přítomen i analyzátor, který podle typu senzoru a sledované veličiny vyhodnocuje určité vlastnosti odraženého paprsku jako je např. posunutí fáze vůči referenčnímu zdroji nebo změna úrovně výkonu na konci sledovaného optovláknového systému. [8] [9].

5.7.1 Senzor hladiny kapaliny

Senzor hladiny slouží k určení výšky hladiny, nebo jako detektor samotné přítomnosti kapaliny. POF vlákno je vhodný kandidát k použití v senzoru jakož to hlavice sloužící k detekci. Hlavními argumenty pro použití POF je snadná manipulace, vysoká numerická apertura, odolnost a rozměry. Využití takového senzoru je nanejvýš vhodné v nebezpečných prostorách, kde se např. nalézají hořlavé a výbušné látky. Povaha optického senzoru maximálně eliminuje možnost vznícení nebo výbuchu. Neméně důležitá je také celková nízká cena za kterou by bylo možné senzor vyrobit. Možností realizace je více, nicméně s ohledem na povahu POF byl vybrán návrh s důrazem na jednoduchost a snadnou realizaci z běžně dostupných komponent. Návrh senzoru vychází z článku [14].

Senzor popsany v této práci využívá zpětného odrazu světla na rozhraní dvou rozdílných prostřední. Obecně platí, že pokud nedochází k úplnému odrazu, část světla se láme do prostřední láme a část se odráží zpět. Pokud světlo dopadá pod pravým úhlem, lze zapsat Fresnelovu rovnici (5.3), která vyjádří množství energie,

kteřá se odrazí zpět. R označuje koeficient odrazu [14]:

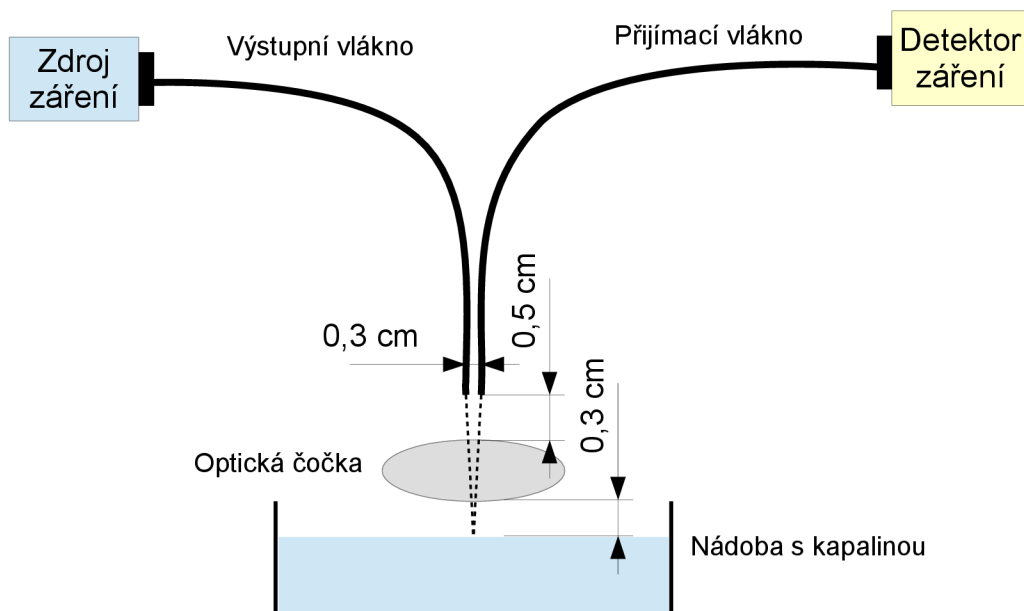
$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (5.3)$$

kde n_1 je index lomu prostředí ze kterého se paprsek láme, tedy vzduch, pak je přibližně $n_1 = 1$. n_2 je index lomu prostředí na které paprsek dopadá. Při praktických testech a měření byla v této práci použita voda s $n_2 = 1,33$. Po dosazení do 5.3 dostaneme:

$$R = \left(\frac{1 - 1,33}{1 + 1,33} \right)^2 = 0,02 \cdot 100 = 2 \% \quad (5.4)$$

Jak je patrné, koeficient odrazu je velmi nízký, pouze 2%. Toto omezení je potřeba brát v potaz při návrhu senzoru. Možnosti řešení jsou probrány dále.

Senzor hladiny se skládá z dvojice standardních polymerových vláken SI-POF s rozměry 980/1000 μm . Do jednoho z páru vláken je navázáno světlo z LED červené barvy ($\lambda = 650 \text{ nm}$). Paprsky prochází vláknem až k jeho konci, který je umístěn nad hladinou kapaliny. Po opuštění vlákna se paprsky dopadají na rozhraní vzduch-voda, kde se částečně lámou směrem do kapaliny a částečně se odrazí zpět. Odražené paprsky jsou zachyceny druhým vláknem z páru a následně přivedeny na detektor záření, kde se provede převod na elektrický signál, který lze následně vyhodnocovat. Schéma zapojení viz obrázek 5.14.



Obr. 5.14: Schéma při měření senzoru hladiny.

Případný senzor by mohl v praxi pracovat na základě změny intenzity záření které dopadá na detektor. Samotná hlava senzoru, tedy konce vláken by byly pevně

upevněny nad prázdnou nádobou nebo místem s očekávaným výskytem kapaliny. Následně by byla změřena úroveň signálu na detektoru. Samozřejmě je potřeba zajistit, aby byla hlava senzoru co možná nejvíce kryta před přímým dopadem okolního světla, což by ovlivňovalo celkovou funkci senzoru. Výsledky z experimentálního měření jsou uvedeny v tabulce 5.9.

Tab. 5.9: Měření senzoru hladiny bez optické čočky.

	Výkon na detektoru [dBm]
Prázdná nádoba	-48,32
Kapalina v nádobě	-47,10

Jak je patrné, rozdíl výkonových úrovní je velmi malý, pouhých 1,22 dBm. V praxi by snadno mohlo dojít z záměně obou hodnot, např. světlem z okolního prostředí.

Pro potencionální zlepšení parametrů senzoru bylo experimentálně ověřeno použití optické čočky ke směřování paprsku. Díky čočce by navíc mohl být prodloužen dosah senzoru, tedy vzdálenost ze které lze kapalinu (resp. hladinu) detekovat. Čočka s průměrem 2 cm byla postupně posouvána směrem k nebo od hladiny což mělo za cíl najít optimální polohu ke stanovení ohniskové vzdálenosti. Nicméně, vzhledem k poměrně nízké intenzitě byla čočka umístěna nad hladinu ve stejné výšce jako konce vláken při měření bez čočky. Hlavním požadavkem bylo docílit vyššího výkonu na detektoru. Naměřené výsledky ukazuje tabulka 5.10. Výkon na detektoru se o něco navýšil, stejně tak rozdíl úrovní vzrostl na 2,73 dBm.

Tab. 5.10: Měření senzoru hladiny s optickou čočkou.

	Výkon na detektoru [dBm]
Prázdná nádoba	-48,43
Kapalina v nádobě	-45,70

Hlavní příčina pozorované relativně nízké úrovně výkonu na detektoru je, že změřený výstupní výkon zdroje záření byl průměrně -9 dBm. Což se ukázalo jako nedostatečné, především pak s ohledem na vlastnost vody která odráží jen 2 % při kolmém dopadu paprsků.

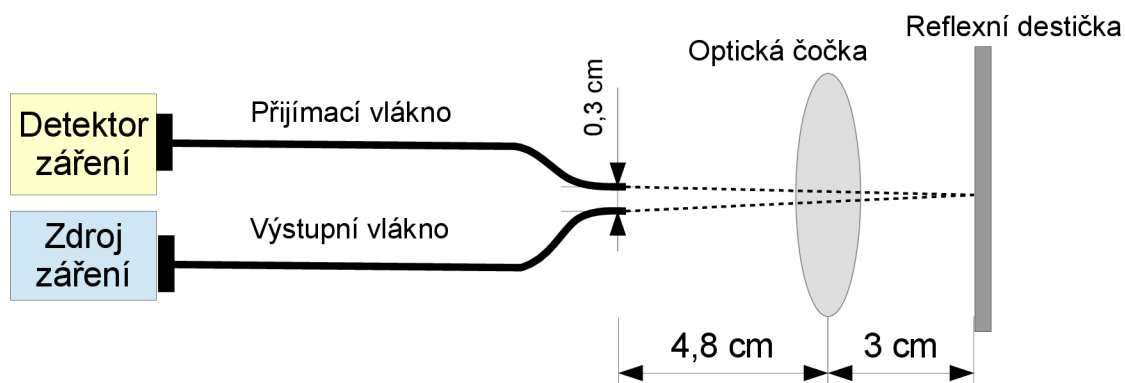
Možná řešení jdou následující:

1. Použít optickou čočku s požadovanými vlastnostmi, která by odražené paprsky lépe vedla do přijímacího vlákna.
2. Použít citlivější detektor světla ve spojení s elektronikou, která bude vyhodnocovat i relativně malé změny výkonu.
3. Pokud předchozí řešení nedostačují tak použít zdroj světla s vyšším výstupním výkonem.

- Změnit návrh senzoru a použít např. metody, kdy se využívá měnící se kritický úhel paprsku při přechodu ze vzduchu do vody (to vyžaduje speciálně upravené vlákno na konci).

5.7.2 Senzor s reflexní destičkou

Jak již bylo popsáno, voda (a kapaliny obecně) odráží v kolmém směru s hladinou zpět jen velmi málo světla. V dalším experimentu byl povrch vody nahrazen reflexivním povrchem, odráží téměř veškeré světlo zpět. Princip je v podstatě stejný. Účel takového senzoru je detekce objektů popř. vzdálenosti k objektům. Opět se vychází z toho že, při změně situace před senzorem, dojde ke změně výkonu na detektoru. Při měření bylo hlavní sledovat závislost vzdálenosti konce vláken od reflexivní destičky. Schéma senzoru ukazuje obrázek. 5.15. Hodnoty z měření senzoru jsou v tabulce 5.11 a grafický průběh je z nich vykreslen na obrázku 5.16.

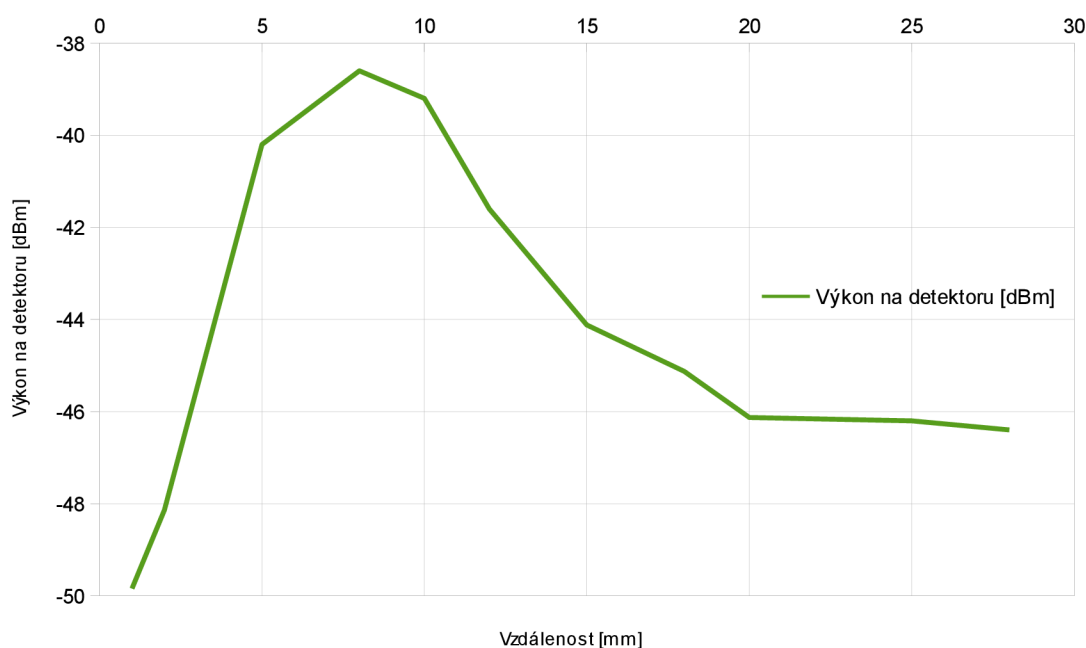


Obr. 5.15: Schéma při měření senzoru s reflexní destičkou.

Při vzdálenosti 1 mm je sice vzdálenost vyzařovacího vlákna od destičce nejmenší a tak se odráží nejvíce paprsků, ale tyto paprsky se neodrážejí do druhého, přijímacího vlákna. Po oddálení konců vláken byla nalezena optimální vzdálenost, přibližně 8 mm. Ještě lepších výsledků bylo dosaženo s optickou čočkou o průměru 2 cm, kdy na mezi destičkou a koncem vláken byla vzdálenost 7,8 cm (3 cm destička-čočka, 4,8 cm čočka-vlákno) a úroveň výkonu na detektoru $-37,60$ dBm. Během měření byla zjištěna hlavní nevýhoda: při použití optické čočky v experimentu, nešlo měnit pozici čočky nebo konce vláken s ohledem na směřování odražených paprsků. To lze případně řešit použitím jiné čočky a vyšším vyzařovacím výkonem LED.

Tab. 5.11: Měření optického senzoru využívající reflexní destičku.

Vzdálenost od destičky [mm]	Výkon na detektoru [dBm]
1	-49,84
2	-48,14
5	-40,14
8	-38,60
10	-39,20
12	-41,60
15	-44,12
18	-45,13
20	-46,13
25	-46,20
28	-46,40



Obr. 5.16: Graf závislosti výkonu na oddalování vlákna od destičky.

5.8 Vyzařovací charakteristika

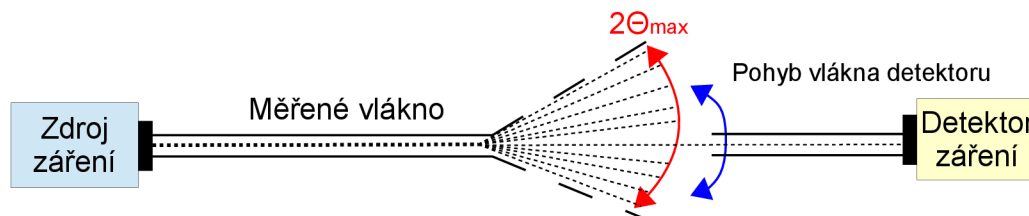
Numerická apertura (podrobně popsáno v kapitole 1.2.3) je důležitý parametr při posuzování účinnosti přechodu světelného záření ze zdroje do vlákna. V případě, že neznáme indexy lomu jádra nebo pláště, lze numerickou aperturu stanovit praktickým měřením pomocí vyzařovací charakteristiky na konci krátkého vlákna. Pozor-

jeme tedy chování světelného záření luminiscenční diody po opuštění vlákna.

Úhel který svírá paprsek po opuštění vlákna s osou vlákna je stejný jako paprsek při vstupu do vlákna. To znamená, že budeme sice zkoumat situaci na konci vlákna, ale výsledky budou shodné jako by bylo měření prováděno na začátku vlákna. Aby bylo měření co nejpřesnější, je nutné měření provádět ve vzdálené oblasti, ve směru od konce vyzařujícího konce vlákna. Vzdálenost od konce vlákna se určí jako vzdálenost mnohonásobně vyšší, než je poměr druhé mocniny průměru vlákna k vlnové délce záření. V případě měření POF by bylo potřeba ideálně měřit ve vzdálenosti 3 metrů.

Druhou podmínkou je homogenní stav ve vlákně. Snahou je co nejvíce potlačit vidovou disperzi záření. Toho lze docílit zařazením vlákna s gradientní změnou indexu lomu, nebo směšovačem vidů. Nesplnění této podmínky se projeví v nerovnoměrnosti vyzařovací charakteristiky na okrajích a výsledkem bude navýšení hodnoty numerické apertury.

Měření spočívá v postupném natáčení detektoru záření kolem středu vlákna a odečítání hodnoty optického výkonu na detektoru, který je zapojen na druhém konci vlákna. Schéma měření je na obrázku 5.17. V našem případě je detektor připojen druhým POF vláknem do přípravku na kterém je umístěn otáčecí mechanismus společně se stupnicí natočení [10].



Obr. 5.17: Schéma při měření numerické apertury.

5.8.1 Výpočet Numerické apertury

Výsledky z realizovaného měření jsou uvedeny v tabulce 5.12. Z této tabulky odečteme hodnotu útlumu při poklesu úrovně optického výkonu na detektoru o -13 dB, což je přibližně 5% výkonu ze zdroje záření.

Úhel θ který odpovídá této hodnotě útlumu je hledaný úhel θ_{\max} . Numerickou aperturu vypočteme podle vztahu:

$$NA = \sin \frac{2 \cdot \theta_{\max}}{2}. \quad (5.5)$$

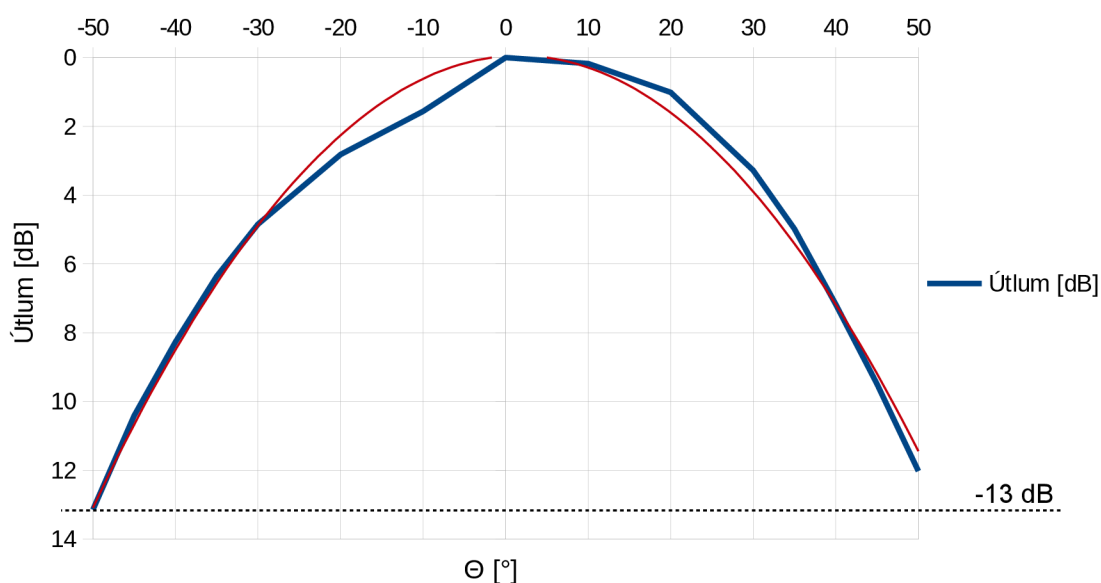
Tab. 5.12: Výsledky měření vyzařovací charakteristiky.

Úhel natočení θ [°]	Optický výkon [dBm]	Útlum [dB]	Úhel natočení θ [°]	Optický výkon [dBm]	Útlum [dB]
50	-59,01	12,02	-50	-60,14	13,15
45	-56,47	9,48	-45	-57,40	10,41
40	-54,16	7,17	-40	-55,26	8,27
35	-51,97	4,98	-35	-53,35	6,36
30	-50,27	3,28	-30	-51,84	4,85
20	-48,00	1,01	-20	-49,81	2,82
10	-47,16	0,17	-10	-49,55	2,56
0	-46,99	-			

Následně dosadíme hodnotu úhlu θ_{\max} pro kterou přibližně odpovídá pokles o 13 dB, v našem případě je to úhel $\theta_{\max} = 50^\circ$:

$$NA = \sin \frac{2 \cdot 50}{2} = 0,76 [-], \quad (5.6)$$

Grafické znázornění vyzařovací charakteristiky je zobrazeno na obrázku 5.18. Modrá křivka představuje naměřené hodnoty, červená je aproximační křivka představující ideální spektrální charakteristiku luminiscenční diody (LED). Střední vlnová délka při měření byla 650 nm.



Obr. 5.18: Graf vyzařovací charakteristiky na konci POF vlákna.

Při měření bylo použito vlákno se skokovou změnou indexu lomu a nikoli gradientní vlákno. Projevuje se zde očekávaná odchylka, která je částečně ovlivněna i zbytkovým světlem z okolí, které dopadá společně se zářením z vlákna na detektor a tím ovlivňuje naměřené hodnoty úrovně výkonu. Provedené měření Numerické apertury tak lze považovat za orientační. Výrobce udává hodnotu $NA = 0,5$ [13].

Ideální zdroj monochromatického světla vyzařuje na jediné vlnové délce. V praxi se tomu přibližují jen velmi přesné lasery pro jednovidová vlákna. Naopak reálné LED kromě střední vlnové délky vyzařují i na postranních vlnových délkách, které jsou od střední vlnové délky vzdáleny o přibližně 5 až 10 nm k vyšší a nižší hodnotě. Po průchodu záření optickým vláknem dojde k rozšíření vstupního pulzu vlivem lineárních i nelineárních jevů, především pak disperzí a útlumem signálu. Výstupní charakteristika pak ukazuje rozšíření především na okrajích spektra vlivem vidové disperze.

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce si kladla za cíl seznámit čtenáře s plastovými optickými vlákny POF.

POF vlákna jsou založena na stejném principu šíření světla jako více známá skleněná vlákna. V práci je popsáno jak se navzájem liší, jsou vyjmenovány hlavní parametry a vlastnosti POF vláken, ze kterých lze vyvodit, jaké jsou výhody či nevýhody užití v té či oné oblasti přenosu dat. Především útlum a dostupná šířka pásma jasně definuje, že plastová vlákna nemohou konkurovat těm na bázi skla. POF vlákna jsou levná na výrobu, nevyžadují drahé zdroje záření a vystačí si s levnějšími LED. Mají malý průměr a jsou lehká. Snadno se instalují a není potřeba zvláštních znalostí nebo speciálních nástrojů. Mechanická odolnost POF je mnohonásobně větší než u vláken na bázi skla a praktické testy ukázali až extrémní odolnost vůči poškození vlákna.

Útlum POF je sice větší, než u skleněných vláken, ale přesto POF vlákna přejímají hlavní benefit a to odolnost vůči elektromagnetickému rušení. To je hlavní výhoda i vzhledem ke konkurenčním přenosovým médiím, jako je metalická strukturovaná kabeláž, koaxiální kabel a nebo stále rozšířenější bezdrátové sítě, které vynikají komfortem, ale jsou již méně vhodná k vysokorychlostním přenosům a přenosům vyžadující nízkou odezvu. Na druhou stranu v posledních letech s příchodem nových bezdrátových standardů se rychlosti přenosu „bezdrátu“ a „metaliky“ pomalu stírají. POF jsou v tomto ohledu poměrně okrajovou záležitostí už z důvodů slabé podpory v koncových zařízeních a malé komerční nabídky produktů. Výrobci síťových prvků zatím nepřišli s jednoznačně lepšími parametry, než jaké nabízí metalická kabeláž, která stále nabízí přenosové rychlosti v řádu gigabitů. Problémem je do jisté míry i neexistující standardizace POF komponent. Segment datových přenosů pomocí POF poslední roky spíše stagnuje.

Hlavní a nejvýznamnější oblastí využití POF je v současnosti automobilový průmysl. Zde jsou využívány hlavní výhody zmíněné již dříve. Jde především o odolnost a nulové rušení od jiných elektrických systémů ve voze. Další oblastí je letecký průmysl, kam ale zatím POF příliš nepronikají, a to z důvodů velmi přísných požadavků na parametry při extrémních či kritických podmínkách, které panují ve vysokých výškách. Z hlediska průmyslových sítí je situace lepší a POF jsou běžně využívány jak k přenosu dat na průmyslových sběrnících, tak k detekci fyzikálních veličin, kdy vlákno slouží jako senzor. Právě optovláknové senzory využívající POF se do budoucna jeví jako velmi perspektivní, hlavně díky předpokládané nízké ceně řešení.

Souhrnně lze říci, že polymerová optická vlákna nabízí mnohé výhody pro specifické využití, popř. jejich parametry se nejlépe hodí pro záměr který požadujeme.

LITERATURA

- [1] *250 Mbps Transceiver in OptoLock®*. Firecomms Ltd. [online]. 2014 [cit. 2014-11-8]. Dostupné z http://www.firecomms.com/downloads/datasheets/2012/FB2M5KVR_Data_Sheet.pdf
- [2] *802.11ac Overview*. Meru Networks. [online]. 2013 [cit. 2014-11-8]. Dostupné z <http://www.merunetworks.com/products/technology/80211ac/>
- [3] ABOUT EoPOF. *DiMoto*. [online]. 2009 [cit. 2014-10-29]. Dostupné z: <http://www.dimoto.com.au/technology.html>
- [4] BOOM, H.P.A. van den, Li, W., Khoe, G.D. *CWDM technology for polymer optical fiber networks* [online]. Delft, Netherlands, 2000 [cit. 2014-10-25]. Proceedings of the 5th annual symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter, 30 October. Dostupné z: <http://repository.tue.nl/667938>
- [5] *CS-240 Media converters*. OPTOKON [online]. 2009 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z http://optokon.cz/sites/default/files/act_08-08_en-cs240.pdf
- [6] *CS-POF Media converters for plastic fiber*. OPTOKON [online]. 2011 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z http://optokon.cz/sites/default/files/act_09_08_en-pof.pdf
- [7] DAUM, V., KRAUSER, J., ZAMZOW, P. E., ZIEMANN, O. *POF: polymer optical fibers for data communication*. Berlin: Springer, 2002, 433 s. ISBN 35-404-2009-6.
- [8] DUSEK, Martin a Michal MAZANEC. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů*. [online]. 2012 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf
- [9] DVOŘÁK, M. *Optické senzory*. [online]. 2007 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z http://www.kompozity.info/clanky/optik_ten/opticke_senzory.pdf
- [10] FILKA, M. *Optické sítě – přednášky*. Brno: ÚTKO FEKT VUT v Brně, 2007.
- [11] FILKA, M. *Optické sítě v telekomunikacích*. 1. vyd. Brno: ÚTKO FEKT VUT v Brně, 2013. ISBN 978-80-214-4900-8.
- [12] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku..* Vyd. 1. Brno: Centa, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

- [13] *FOP kabel, 0,98/1mm, duplex, 2x2,2mm, 0,2dB/m@650nm, PE, 1,25km*. ASM a.s. [online]. 2013 [cit. 2015-03-06]. Dostupné z: <http://www.asm.cz/asmdata/fop-kabel-0981mm-duplex-2x22mm-02dbm650nm-pe-125km.html>
- [14] FORONI, Matteo, Michele BOTTACINI, Federica POLI, Annamaria CUCINOTTA a Stefano SELLERI. Low-cost level and pressure plastic optical fiber sensor. In: *Optical Sensing II*. [online]. 2006 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z http://www.researchgate.net/publication/228837827_Low-cost_level_and_pressure_plastic_optical_fiber_sensor. DOI: 10.1117/12.662964.
- [15] *G.657 Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network*. ITU-T [online]. 2012 [cit. 2015-02-21]. Dostupné z <http://www.itu.int/rec/recommendation.asp?lang=en&parent=T-REC-G.657-201210-I>
- [16] *Gigabit ethernet transmission experiments using GI-POF* [online]. Brussels, Belgium, 2001 [cit. 2014-10-25]. Proceedings of the 6th annual symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2 December 2001. ISBN 90-5487247-0. Dostupné z: <http://repository.tue.nl/665068>
- [17] *Graded-Index Polymer Optical Fiber (GI-POF)*. Thorlabs [online]. 2008 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z <http://www.thorlabs.com/catalogPages/1100.pdf>
- [18] Industrial Automation & Networking Solutions Guide. *Firecomms Ltd*. [online]. 2012 [cit. 2014-10-29]. Dostupné z: http://www.firecomms.com/downloads/solution_guides/FCommsIndustrialAutomation.pdf
- [19] Industrial Control Plastic Optical Fiber Cable. *Xmultiple*. [online]. 2008 [cit. 2014-10-29]. Dostupné z: <http://www.xmultiple.com/Fiber/Industrial%20Control%20Plastic%20Optical%20Fiber.pdf>
- [20] KIZLINK, J. *Technologie chemických látek*. Vyd. 3., přeprac. a dopl. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005, 282 s. ISBN 80-214-2913-5.
- [21] KREJČÍ, Jaroslav a LAFATA Pavel. *Současné a budoucí možnosti řešení přístupové sítě pro IPTV*. *Elektrorevue* [online]. 2010, č. 64 [cit. 2014-11-01]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/soucasne-a-budouci-moznosti-reseni-pristupove-site-pro-iptv/>
- [22] MOST Network. *MOST Cooperation* [online]. 2014 [cit. 2014-10-26]. Dostupné z: <http://www.mostcooperation.com/en/technology/most-network/>

- [23] *OFT-820 POF series Plastic optical fiber - Loss Test Set*. OPTOKON [online]. 2013 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z http://optokon.cz/sites/default/files/teq_06-09_en-oft-820-pof.pdf
- [24] *Optical Implementation Using IEEE-1394.b*. TEXAS INSTRUMENTS. 2004. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sgza001a/sgza001a.pdf>
- [25] P. FISCHER, U. H., M. HAUPT a M. JONCIC. Optical Transmission Systems Using Polymeric Fibers. *Optoelectronics - Devices and Applications* [online]. InTech, 2011-10-05 [cit. 2014-10-26]. DOI: 10.5772/19448. Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/20494.pdf>
- [26] *POF Cables, Patch Cords and Plugs Data Sheet*. Firecomms Ltd. [online]. 2013 [cit. 2014-11-11]. Dostupné z http://www.firecomms.com/downloads/datasheets/2012/POF_Cables_Data_Sheet.pdf
- [27] *POF@10G Group Announces 10G Transmission Over Graded Index Plastic Optical Fibre* [online]. 2006 [cit. 25-10-2014]. Dostupné z: http://www.chromisfiber.com/pdf/PRPOF_10G.pdf
- [28] Standard POF. *POF Application Center* [online]. 2014 [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <http://www.pofac.info/en/homepage/what-are-pof/standard-pof.html>
- [29] TRULOVE, James. *Sítě LAN: hardware, instalace a zapojení*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, 384 s. ISBN 978-80-247-2098-2.
- [30] VAŠINEK, Vladimír. *Optické komunikace 1 pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. 1. vyd. Ostrava: Katedra telekomunikační techniky VŠB-TOU, 2014.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

<i>A</i>	útlum
AON	Active Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
b/s	bit za sekundu
BMW	Bayerische Motoren Werke AG
<i>c</i>	rychlost světla ve vakuu
CAN	Controller Domestic Bus
CD	Compact Disc
CO	Central Office
D2B	Domestic Digital Bus
dB	decibel
dB/km	decibel na metr
dBm	decibel vztažený k výkonu 1 mW
DSI-POF	Double Step Index Polymer Optical Fiber
DVD	Digital Versatile Disc
FTP	Foiled Twisted Pair
FTTB	Fibre to the Building
FTTH	Fibre to the Home
GI-POF	Graded Index Polymer Optical Fiber
GPS	Global Positioning System
HD	High-definition
Hz	hertz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol

IPTV	Internet Protocol television
ISO	International Organization for Standardization
ISP	Internet service provider
<i>L</i>	délka
LAN	Local area network
LCD	Liquid-crystal display
LED	Light-emitting diode
MC-POF	Multi Core Polymer Optical Fiber
m	metr
MOST	Media Oriented Systems Transport
MSI-POF	Multi Step Index Polymer Optical Fiber
<i>n</i>	index lomu
N	newton
<i>NA</i>	Numerická apertura
OLT	Optical Link Termination
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
OSI	Open Systems Interconnection
<i>P</i>	výkon
PCI	Peripheral Component Interconnect
PF-GI-POF	Perfluorinated Graded Index Polymer Optical Fiber
PIN	P-I-N přechod
PMMA	Poly methyl methacrylate
POF	Polymer Optical Fiber
PON	Passive Optical Network

PROFIBUS	Process Field Bus
PTFE	Polytetrafluorethylen
QoS	Quality of Service
R	koeficient odrazu
SERCOS	Serial Real-time Communication System
SI-POF	Step Index Polymer Optical Fiber
STP	Shielded Twisted Pair
USB	Universal Serial Bus
UTP	Unshielded Twisted Pair
VCSEL	Vertical-cavity surface-emitting laser
VLAN	Virtual local area network
VoIP	Voice over IP
WDM	Wavelength-division multiplexing
WLAN	Wireless Local Area Network
α	měrný útlum
θ	úhel
λ	vlnová délka
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah DVD

67

A OBSAH DVD

Elektronická verze práce ve formátu PDF.