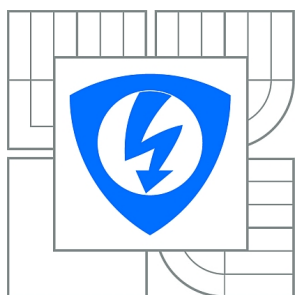


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## VYUŽITÍ POF V PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH

THE UTILIZATION OF POF IN ACCESS NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDŘEJ DOLEŽAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Teleinformatika

**Student:** Ondřej Doležal

**ID:** 134473

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2012/2013

**NÁZEV TÉMATU:**

## Využití POF v přístupových sítích

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem práce je seznámení se s POF vlákny, s jejich vlastnostmi a s možností jejich využití v přístupových sítích. Porovnejte jejich výhody a nevýhody s vlákny na bázi skla. Navrhněte metodiku práce s POF vlákny, včetně měření jejich parametrů. Proveďte návrh cvičného polygonu s vlákny POF, proveďte měření na sestavené síti a navrhněte návaznost POF sítě na síť FTTH.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. CENTA, Brno 2009.
- [2] TRULOVE, J. Síť LAN. Mc.Graw - Hill, N.Y. 2006. (Český 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:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 5.6.2013

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

**Konzultanti bakalářské práce:**

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

V rámci této práce se čtenář seznámí s plastovými optickými vlákny (POF). Nejprve jsou zmíněny základy optického přenosu. Dále jsou popsány základní vlastnosti a parametry POF, následuje historický vývoj, bližší popis jednotlivých typů POF, jejich důležité přednosti i nedostatky, srovnání se skleněnými vlákny, práce, instalace, dostupné konektory a měření POF a shrnutí zásadních poznatků z praxe, včetně popisu již realizovaných experimentů a projektů.

Druhá část práce je zaměřena na využití POF v přístupových sítích. Napřed jsou popsány současné trendy v přístupových sítích, následuje přehled optických přístupových sítích a vysvětlení konceptu FTTH se začleněním POF vláken do určitých variant. Dále jsou popsány možnosti POF vláken v segmentu lokálních sítí a jejich připravenost na moderní síťové služby, jako je například IPTV.

Předposlední kapitola zahrnuje návrh testovacího polygonu a závěrečná část shrnuje veškeré poznatky a výsledky této práce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

POF, plastová optická vlákna, optický přenos, lokální síť, přístupové síť, FTTH

## **ABSTRACT**

In this work, the reader familiarizes with plastic optical fiber (POF). Firstly are mentioned the basics of the optical transmission. Then there are the main features and parameters POF and a historical overview, detailed description of the types of POF, their important strengths and weaknesses, comparison with glass fiber, installation, available POF connectors and procedure of measurements and a summary of key findings from the practice, including a description of existing experiments and projects.

The second part focuses on the use of POF in access networks. There are described present trends in access networks, an overview of optical access networks and explanation the concept with the inclusion of POF in optical networks (FTTH). Furthermore, there are possibilities of POF fibers in segment of local networks and their readiness for advanced network services, such as IPTV.

The penultimate chapter contains design test polygon and final part summarizes all findings and results of this work.

## **KEYWORDS**

POF, Plastics optical fibers, optical transmission, access network, FTTH

DOLEŽAL, Ondřej *Využití POF v přístupových sítích*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 55 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Využití POF v přístupových sítích“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci a panu Ing. Janu Šporikovi za metodické rady a pomoc s praktickou realizací v laboratoři.

Brno .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

Úvod	10
<b>1 Základy POF</b>	<b>11</b>
1.1 Historie a vývoj	11
1.2 Princip optického přenosu	12
1.3 Ztráty optického vlákna	13
1.4 Rozdělení POF	15
1.4.1 Vlákna POF se skokovou změnou indexu lomu (SI-POF)	15
1.4.2 Vlákno POF se sníženou hodnotou numerické apertury (Low NA-POF)	17
1.4.3 Vlákno POF s dvojitým skokovým indexem lomu (DSI-POF)	17
1.4.4 Vlákno POF s mnohonásobným skokovým indexem lomu (MSI-POF)	17
1.4.5 Vlákno POF s mnoha jádry (MC-POF)	18
1.4.6 Vlákna POF s proměnou změnou indexu lomu (GI-POF)	18
1.5 Srovnání se skleněnými vlákny	20
<b>2 Práce s POF</b>	<b>22</b>
2.1 Instalace	22
2.2 Konektory a spojování	22
2.2.1 Přehled konektorů	22
2.2.2 Bezkonektorová řešení	23
2.3 Měření	24
<b>3 Vyžití POF v přístupových sítích</b>	<b>25</b>
3.1 Stávající řešení přístupových sítí	25
3.2 Varianty optických přístupových sítí	25
3.2.1 Síť typu bod-bod (PTP)	26
3.2.2 Síť typu bod-multi bod (PTMP)	26
3.2.3 Aktivní optická síť (AON)	26
3.2.4 Pasivní optická síť (PON)	26
3.3 Začlenění POF vláken do konceptu FTTH	27
3.4 Topologie optické přístupové sítě	28
3.4.1 Varianta FTTH	29
3.4.2 Varianta FTTB	30
3.5 Domácí a lokální sítě	32
3.6 Porovnání parametrů POF s metalickou kabeláží	33

<b>4 Testovací polygon</b>	<b>35</b>
4.1 Aktivní prvky . . . . .	35
4.1.1 Jednotka ONU . . . . .	35
4.1.2 Jednotka OLT . . . . .	36
4.1.3 POF přepínač . . . . .	36
4.1.4 POF převodník . . . . .	37
4.1.5 Počítač typu server . . . . .	37
4.1.6 Počítač typu klient . . . . .	37
4.2 POF vlákno . . . . .	38
4.3 Zapojení polygonu . . . . .	38
4.4 Měření síťových parametrů . . . . .	39
4.4.1 Testování IPTV . . . . .	39
4.4.2 Měření zpoždění signálu . . . . .	39
4.5 Měření mechanických a přenosových parametrů . . . . .	39
4.5.1 Vliv nástrojů na kvalitu zakončení konce vlákna . . . . .	39
4.5.2 Stanovení útlumu optické spojky . . . . .	40
4.5.3 Přípravek OPTEL . . . . .	41
4.5.4 Makroohyby vlákna . . . . .	44
4.5.5 Mikroohyby vlákna . . . . .	47
4.5.6 Zkouška přerušení komunikace . . . . .	47
<b>5 Závěr</b>	<b>49</b>
<b>Literatura</b>	<b>50</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>52</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>54</b>
<b>A Obsah DVD</b>	<b>55</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Šíření světelného paprsku optickým vláknem. . . . .	12
1.2	Schéma obecného optického spoje. . . . .	13
1.3	Šíření paprsků světla v SI-POF vlákně. . . . .	15
1.4	Útlumová charakteristika SI-POF vlákna . . . . .	16
1.5	Šíření paprsků světla v GI-POF vlákně. . . . .	18
1.6	Srovnání velikosti průměru POF a vláken na bázi skla . . . . .	20
3.1	Návrh přístupové sítě s využitím skleněných a POF vláken. . . . .	28
3.2	Sít FTTH s využitím POF vláken v lokální síti. . . . .	29
3.3	Schéma sítě FTTB s využitím POF vláken v lokální síti. . . . .	31
3.4	Lokální síť s POF a napojením na přístupovou síť. . . . .	32
4.1	Testovací polygon s využitím POF vláken. . . . .	35
4.2	POF přepínač OPTOKON OPSW-24-OL2. . . . .	37
4.3	Zapojení části testovacího polygonu ve stojanu. . . . .	38
4.4	Zakončení POF vlákna pomocí různých nástrojů. . . . .	40
4.5	Duplexní spojka typu OptoLock. . . . .	41
4.6	Zapojení pracoviště s přípravkem OPTEL. . . . .	41
4.7	Graf závislosti útlumu optického výkonu na oddalování vláken. . . . .	42
4.8	Graf závislosti útlumu optického výkonu na úhlové odchylce. . . . .	43
4.9	Graf závislosti útlumu optického výkonu na příčné odchylce. . . . .	44
4.10	Graf závislosti útlumu na poloměru ohybu a počtu ohybů. . . . .	45
4.11	Graf závislosti útlumu na počtu zkrutů. . . . .	46
4.12	Přípravek pro vytváření mikroohybů a dvojce POF převodníků. . . . .	47



## SEZNAM TABULEK

4.1	Úrovně signálu pro různé nástroje použitých při zakončení POF vlákna	40
4.2	Závislost útlumu na oddalování konců vláken. . . . .	42
4.3	Závislost útlumu na úhlové odchylce konců vláken. . . . .	43
4.4	Závislost útlumu na příčné odchylce konců vláken. . . . .	44
4.5	Závislost útlumu na průměru ohybu a počtu ohybů. . . . .	45
4.6	Závislost útlumu signálu vlivem kroucení vlákna . . . . .	46

# 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.

Postupem času ale nastala otázka, jak kvalitativně navyšovat přenosové kapacity blíže zákazníkovi. Z tohoto pohledu je koncepce optických přístupových sítí velmi důležitá, protože moderní síťové služby, které zákazník vyžaduje musí mít oporu v dostatečně kvalitní síťové infrastruktuře.

Přestože náklady na výstavbu optických sítí stále klesají, pořád představují značnou překážku k rychlejšímu rozvoji v oblasti přístupových sítí a je tedy nutné hledat úspornější způsob řešení problému poslední míle. Druhá velká oblast potenciálu je otázka domácích sítí, kde v současné době dominují metalická vedení, která s nástupem moderních služeb, jako je televize ve vysokém rozlišení (HDTV), přestávají kapacitně stačit.

POF vlákna se zdají být do budoucna velmi kompaktním 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 bakalářská práce má za cíl seznámit 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. Jelikož v uvedeném segmentu stále převládá metalická strukturovaná kabeláž, v práci je také popsáno, jaké jsou rozdíly vůči POF. V rámci práce je také navrhnut testovací polygon, který by měl v praxi sloužit k seznámení POF vlákny a také je nastíněno společné použití plastových vláken a pasivních optických sítí.

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

# 1 ZÁKLADY POF

Plastové nebo někdy též polymerové optické vlákno (anglicky Polymer popř. Plastic Optical Fiber, zkráceně POF) je druh optického vlákna, vyrobeného z umělé hmoty (polymeru). Právě materiál vlákna převážně určuje další parametry přenosu signálu, popsaných dále.

## 1.1 Historie a 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 [3].

V téže době se začaly rozšiřovat skleněná optická vlákna u kterých se útlum pohyboval okolo 1 dB/km, pro vlnové délky 1300 a 1500 nm. Skleněná optická vlákna poskytovala ohromné přenosové kapacity, velký dosah, přijatelnou cenu a širokou dostupnost. Na dálkových přenosových trasách se tak skleněná optická vlákna dostala do jasně vedoucí pozice. V segmentu lokálních sítí naopak jasně dominovalo metalické vedení. Koaxiální a později kroucené páry vodičů poskytovaly dostatečné parametry a vzhledem k nízké ceně byly široce rozšířené.

V této situaci bylo pochopitelné, že plastová vlákna neměla vůbec jednoduchou pozici a trh pro ně nedokázal najít perspektivní užití. Jejich vývoj se tak velmi zpomalil na mnoho let.

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.

## 1.2 Princip optického přenosu

POF vlákna, podobně jako skleněná optická vlákna slouží k vhodnému vedení paprsku světla, který nese informaci. Plastové optické vlákno je optický vlnovod, vyrobený z průsvitného polymeru. Vlákno je složeno ze dvou částí, z jádra a pláště.

Z pohledu optického přenosu je využíváno tzv. totálního odrazu světla, kdy je dopadající paprsek zcela odražen na rozhraní dvou prostředí s rozdílnou hodnotou indexu lomu. Index lomu  $n$  je bezrozměrná veličina, která popisuje šíření světla v látkách. Vztah

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

vyjadřuje poměr rychlosti světla ve vakuu  $c$  k rychlosti světla v daném materiálu  $v$ .

Aby byla splněna podmínka totálního odkazu, musí být index lomu jádra  $n_1$  vyšší hodnoty než index lomu pláště  $n_2$  [1]. Platí tedy následující vztah:

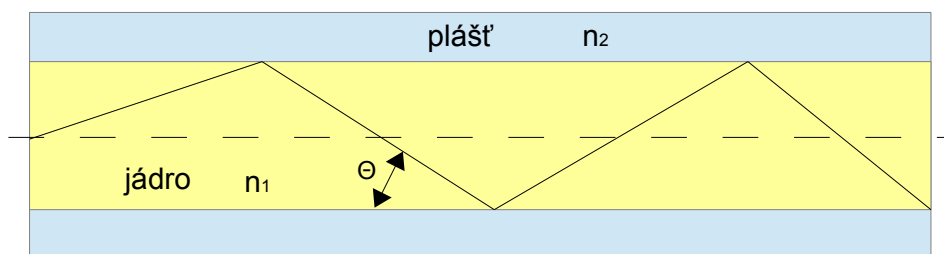
$$n_1 > n_2. \quad (1.2)$$

Dalším důležitým parametrem je Numerická apertura, zkráceně  $NA$ , která popisuje účinnost přechodu paprsku ze zdroje záření do optického vlákna, popř. přechod mezi dvěma vlákny, nebo vlákem a detektorem záření. Je dána vztahem:

$$NA = \sin \Theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (1.3)$$

Paprsky vstupující do vlákna musejí být navázány pod úhlem menším než  $\Theta_{max}$ . V opačném případě nedojde k totálnímu odrazu a paprsek se láme pod určitým úhlem do pláště. U POF vláken není pečlivé navázání paprsku do vlákna tak přísně vyžadováno jako u vláken na bázi skla, nicméně nesprávným navázáním vzniká nežádoucí vložný útlum, který nepříznivě ovlivňuje přenos signálu vlákem.

Správné šíření světelného paprsku v optickém vlákne zachycuje obrázek 1.1. Úhel dopadu a odrazu paprsku je označen jako  $\Theta$ .

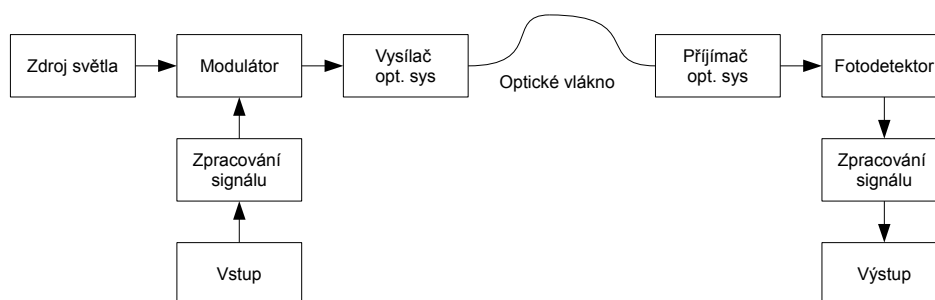


Obr. 1.1: Šíření světelného paprsku optickým vlákem.

Optický spoj na obrázku 1.2 obsahuje tři základní celky: vysílač, přenosové prostředí (v tomto případě optické vlákno) a přijímač. Vysílač je tvořen zdrojem světla (luminiscenční dioda nebo laser), který je modulován v optickém modulátoru. Na ten je přiveden vstupní elektrický signál z obvodů pro zpracování signálu. Modulovaný signál je poslán do bloku vysílače optického systému.

Přes vstupní konektor je paprsek navázán do optického vlákna. 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 všech částí vysílače i přijímače na každé straně přenosu. U POF vláken je toto řešeno použitím dvěma samostatnými vlákny, jedno pro vzestupný směr a druhé pro sestupný směr komunikace.



Obr. 1.2: Schéma obecného optického spoje.

### 1.3 Ztráty optického vlákna

Na začátku vlákna je zdroj záření který vytváří světlo. Paprsky světla jsou navázány do vlákna a mají určitou úroveň výkonu. S přibývajícím vzdáleností od tohoto zdroje světlo ztrácí svoji energii a tím narůstá útlum.

Obecně lze útlum ve vláknech popsat vztahem

$$P = \frac{P_{\text{vyst}}}{P_{\text{vst}}} [W], \quad (1.4)$$

ten vyjadřuje poměr, mezi výkonem na konci vlákna  $P_{\text{vyst}}$  a začátku vlákna  $P_{\text{vst}}$  v jednotkách výkonu Watt [2].

Nejčastěji útlum udáváme v logaritmicím měřítku pomocí vztahu

$$A = 10 \log \frac{P_{\text{vyst}}}{P_{\text{vst}}} [dB]. \quad (1.5)$$

Útlum v dB je v tomto případě vztažen k hodnotě výkonu 1 mW. V oblasti optických přenosů je důležité vyjádřit útlum signálu s ohledem na vzdálenost přenosu. Tímto vyjádřením je měrný útlum, ten udává poměr útlumu signálu vůči délce optického vlákna. Obecnou jednotkou je dB/km popř. dB/m.

Útlum signálu může nastat z více příčin. 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 tak, že zvolíme vhodné komponenty, 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 následující [1]:

- **Ztráty ohybem.** Tento typ ztrát vzniká ohýbáním vlákna a tím vzniknutí většinou nežádoucích ohybů. 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.
- **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:
  1. Rayleigho rozptyl – Vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky. Nelze dostatečně odstranit
  2. Mienův rozptyl – Je způsoben mikroskopickými bublinkami, napětím a nedokonalostmi ve vlákně, srovnatelnými s použitou vlnovou délkou.
  3. Rozptyl na nečistotách – Podobný rozptyl jako Mienův, ale velikost nečistot je větší než vlnová délka.
- **Ztráty absorpcí.** Jedná se o jev, kdy se elektromagnetická energie mění na tepelnou. Je možné dělit na:
  1. Vlastní absorpce – Je neodstranitelná a záleží na použité vlnové délce a materiálu. U POF vláken poměrně zanedbatelná.
  2. Příměsová absorpce – Způsobují ji volné molekuly látek ve vlákně. Nejčastěji se jedná o vodní ionty (OH). Důsledkem je vznik mikrotrhlin a tím narušení celistvosti vlákna. Volné ionty OH také zapříčiňují vysoký nárůst útlumu na určitých vlnových délkách.

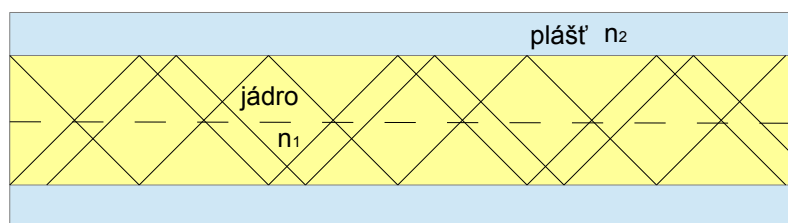
- **Ztráty disperzí.** Spíše než útlum, způsobuje disperze rozprostření energie paprsku v čase, dojde tedy ke zkreslení přenášeného signálu. POF vlákna jsou disperzí do jisté míry ovlivňována, záleží na konkrétním druhu disperze:
  1. **Módová disperze** – Ve vlákně se jednotlivé módy šíří po různě dlouhých délkách, to znamená, že čas, který je potřeba k šíření není stejný. Dojde tak k rozšíření vstupního pulzu. Týká se mnohavidových optických vláken, tedy i POF.
  2. **Chromatická disperze** – Je založena na kmitočtové závislosti indexu lomu. To znamená, že jednotlivé frekvence se ve vlákně šíří po různých optických trasách. Například u vláken ze sloučeniny PMMA může časový rozdíl dosahovat až 25 ns na 100 metrů. K chromatické disperzi je potřeba ještě přidat materiálovou disperzi, která má podobný způsob vzniku a je závislá na materiálu vlákna.
  3. **Vidová disperze** – Je způsobena rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých vidů ve vlákně.

## 1.4 Rozdělení POF

### 1.4.1 Vlákna POF se skokovou změnou indexu lomu (SI-POF)

SI-POF (Step Index POF) vlákna představují vývojově nejstarší typ POF vláken, první pokusy o výrobu byly provedeny již v 70. letech 20. století. 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, běžně kolem 60 dB/km. [3].

Paprsek se ve vlákně šíří skokově. To je způsobeno rozdílnou hodnotou indexu lomu jádra a pláště. Princip šíření je zobrazen na obrázku 1.3.

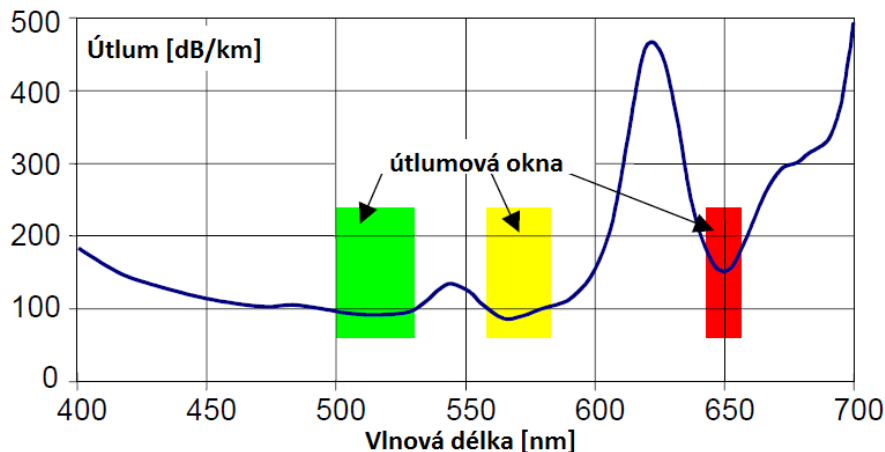


Obr. 1.3: Šíření paprsků světla v SI-POF vlákně.

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.

Vlákno se skládá z jádra, které má typické rozměry  $990\ \mu\text{m}$  a index lomu 1,492 (popř. různé varianty až do hodnoty 1,50). Zbytek vyplňuje opláštění s průměrnou tloušťkou  $10\ \mu\text{m}$  a indexem lomu 1,412. Většina vláken obsahuje jednoduchou ochranu s tloušťkou v řádu několika milimetrů. Útlumová charakteristika je vykreslena v grafu na obrázku 1.4, podle [5].



Obr. 1.4: Útlumová charakteristika SI-POF vlákna

Ve výše uvedeném grafu jsou zobrazena tři útlumová okna, na kterých má vlákno nejmenší útlum a tudíž jsou předně využívána pro přenos. Konkrétně jde o 520 nm (zelená), 560 nm (žlutá) a 650 nm (červená). Jako zdroj světla se používají LED diody, které jsou jednoduché na výrobu a velmi levné. Jejich vyzářovací charakteristika je oproti laseru poměrně široká a přesnost nosné vlnové délky je  $\pm 10\ \text{nm}$ . 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 omezenou na hodnotu 40 až 50 MHz při délce vlákna 100 m. Vhodnost pro datové přenosy je omezená také vzhledem k zdatelné disperzi signálu. Dosažené přenosové rychlosti jsou standardně do 100 Mb/s a další navyšování je problematické bez použití pokročilejšího typu modulace.

Například ve společnosti KDPOF realizovali bezchybný přenos o rychlosti 1 Gb/s na standardních SI-POF vláknech o délce 50 metrů. Tento pokus prokazuje, že i nejjednodušší a tím i nejlevnější varianty POF vláken mohou dosahovat dobrých výsledků [17].



Budoucí vývoj se zaměřuje na různé modifikace SI-POF vláken a nebo rovnou na zcela jiný druh GI-POF. Postupně se objevily tyto modifikace SI-POF vláken [3]:

#### **1.4.2 Vláknó POF se sníženou hodnotou numerické apertury (Low NA-POF)**

Původní záměr byl použít tento typ vláken pro přenos technologie ATM (Asynchronous Transfer Mode) v rámci lokálních sítí. Hlavní vlastností je snížení  $NA$  na 0,3 a tím navýšení šířky přenosového pásma na 100 MHz na 100 metrů. V praktických testech se ale ukázalo, že na tomto typu vlákna nelze dostatečně spolehlivě realizovat přenos, z důvodů vysoké citlivosti na mechanické ohyby vlákna a tím i nárůst útlumu vlákna.

#### **1.4.3 Vláknó POF s dvojitým skokovým indexem lomu (DSI-POF)**

Vláknó DSI-POF (Double Step Index POF) má dvě vrstvy pláště, vnitřní a vnější. Světlo se láme na jednom, nebo druhém plášti v závislosti na poloměru ohybu. Díky tomu není porušen zákon úplného odrazu paprsku, který je pro správné šíření paprsku vlákem nezbytné dodržet. Tento princip řeší problém příliš vysokých ztrát ohybem, které byly u Low NA-POF. Na druhou stranu zde je problém vyššího útlumu vlivem dvojitého pláště a také vliv disperze signálu při velkém počtu ohybů na dlouhém vláknu. Jako u předchozího typu Low NA-POF je snížená numerická apertura na hodnotu kolem 0,30. Šířka přenosového pásma je 100 MHz do vzdálenosti 100 metrů. Vzhledem k dostatečné šířce pásma a nízké disperzi signálu na kratší vzdálenost, se DSI-POF zdají ideálním vlákem do lokálních sítí.

#### **1.4.4 Vláknó POF s mnohonásobným skokovým indexem lomu (MSI-POF)**

Průměr MSI-POF (Multi Step Index POF) vlákna je 990  $\mu\text{m}$ . Jedná se o 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. Hodnota numerické apertury je v rozmezí 0,25 až 0,30, přičemž je ale docíleno širšího přenosového pásma, až 500 MHz na vláknu délky 100 metrů.

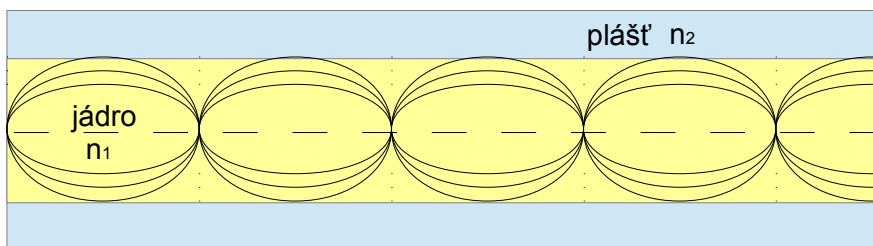
### 1.4.5 Vlákno POF s mnoha jádry (MC-POF)

Ve vláknech MC-POF (Multi Core POF) jsou 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. Šířka pásma je 100 Mhz. Existuje kombinace DSI-MC-POF, tedy vlákno s mnoha jádry a dvojitým skokovým indexem lomu. U této varianty se podařilo navýšit šířku pásma pro přenos až na 700 MHz na 50 metrů, umožňující gigabitové přenosy. Kvůli náročnosti při výrobě se tento typ používá velmi omezeně.

### 1.4.6 Vlákna POF s proměnou změnou indexu lomu (GI-POF)

Vlákna GI-POF (Graded Index POF) mají proměnou (gradientní) změnu indexu lomu světla, to znamená, že index lomu se snižuje v závislosti na vzdálenosti od středu osy jádra k plášti vlákna. Paprsek světla se nešíří skokově, ale ve tvaru paraboly (více paprsků tak vytváří elipsy). Hlavní výhodou GI-POF vláken je snížení vidové disperze a tím i navýšení dostupné šířky pásma.

Pro lepší představu je na obrázku 1.5 zobrazeno šíření paprsků světla v GI-POF vláknu.



Obr. 1.5: Šíření paprsků světla v GI-POF vláknu.

U vláken založených na sloučenině PMMA se hodnota útlumu pohybuje kolem 200 dB/km a kvůli tomu se předpokládá dosah v desítkách metrů. Lepších výsledků lze dosáhnout díky vláknům které jsou vyrobeny z fluorovaných polymerů (tzv. PF-GI-POF). Tyto vlákna mohou mít útlum snížen až k hodnotě 20 dB/km a šířku pásma přibližně 2 GHz na 100 metrů. Taktéž je minimalizován dopad chromatické disperze na přenos a lze tak počítat s rozvojem výroby mnohavidových vláken, popř. nasazení těchto vláken do vlnových multiplexů.

Při vzdálenostech do 100 metrů se dá s GI-POF vlákny realizovat přenos o rychlosti 1 Gb/s a experimentálně se podařilo dosáhnout až 10 Gb/s [4]. Numerická apertura má podobnou hodnotu, jako novější typy SI-POF vláken, tedy 0,2 nebo 0,3 [13].

Nejmenší útlum GI-POF vláken je na hodnotách vlnových délek 650 nm a 850 nm. Nově se také začalo používat pásmo kolem 1200 nm a hlavně 1300 nm, na kterém je dosaženo nízkého útlumu 15 dB/km a lze tak dosahovat přenosové rychlosti v řádu několika gigabitů za sekundu.

Vzhledem k příznivým vlastnostem GI-POF vláken se mnoho experimentů a vývojových projektů zaměřuje právě na tento typ vláken. Následuje zmínka některých z nich:

V experimentálním návrhu zmíněném v [6] je například použito singlemode vlákno nasvícené světelným paprskem o vlnové délce 1317 nm, délce spoje 20 km pro překonání nejdélejší vzdálenosti k zákazníkovi a 50 m dlouhé GI-POF vlákno s útlumem menší než 20 dB/km a šířkou pásma přes 1,1 GHz, zdroj měl vlnovou délku 1317,26 nm.

Další experiment [11], počítá s využitím spojové vrstvy Gigabit Ethernet pro přenos a tím i snazší implementací do stávajících sítí postavených na technologii Ethernet. Bylo použito GI-POF vlákno, složené ze tří úseků délky 330 metrů, celkem 990 metrů. Vlákno bylo nasvíceno světlem o vlnové délce 840 nm pomocí VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) laserem, poskytující šířku pásma 2 GHz. Vlákno bylo zakončeno přijímačem s fotodiodou a za ním měřicí aparaturou. Výsledky byly tyto: dosažená přenosová rychlost 1,25 Gb/s, chybovost přenosu (BER)  $10^{-9}$ , celkový útlum trasy 27 dB/km.

Experiment s PF-GI-POF vláknem, konkrétně typem CYTOP dokázal vhodnost tohoto typu vlákna na budoucí vysokorychlostní přenosy. Bylo dosaženo hodnoty 7 Gb/s na vzdálenost 80 metrů. Zdroj záření VCSEL laser měl výstupní výkon 4,5 mW při vlnové délce 930 nm, jádro vlákna mělo průměr 155  $\mu\text{m}$ .

Ještě rychlejší přenos oznámila v roce 2006 skupina komerčních subjektů nazvaná POF@10G [12]. Na délce 100 metrů GI-POF vlákna byla naměřena rychlost 10 Gb/s. V budoucnu by mohlo dojít k postupnému nahrazení současného standardu 10GBase-T který využívá metalických spojů právě GI-POF vlákny které mohou být levnější alternativou s lepšími parametry. Vysokorychlostní spojení na krátkou vzdálenost, v řádu metrů, se vyskytuje především v datových a propojovacích centrech telekomunikačních operátorů. Nasazení GI-POF vláken by mohlo přinést značné finanční úspory. Sdružení POF@10G dokonce odhaduje, že by se takto dalo ušetřit až 75% výdajů za spotřebu elektrické energie a 50% pořizovací ceny oproti kabelům na bázi mědi. Z technického hlediska byl tento experiment podobný tomu z předchozího odstavce. VCSEL laser naladěný na vlnovou délku 850 nm na jedné straně vlákna a na druhé přijímač vylepšený o systém kontroly disperze (Electronic Dispersion Control, EDC).

V roce 2011 se podařilo v rámci projektu Evropské unie, nazvaném POF-PLUS dosáhnout na 50 metrech rychlosti 1 Gb/s a na 35 metrech dokonce až 10 Gb/s

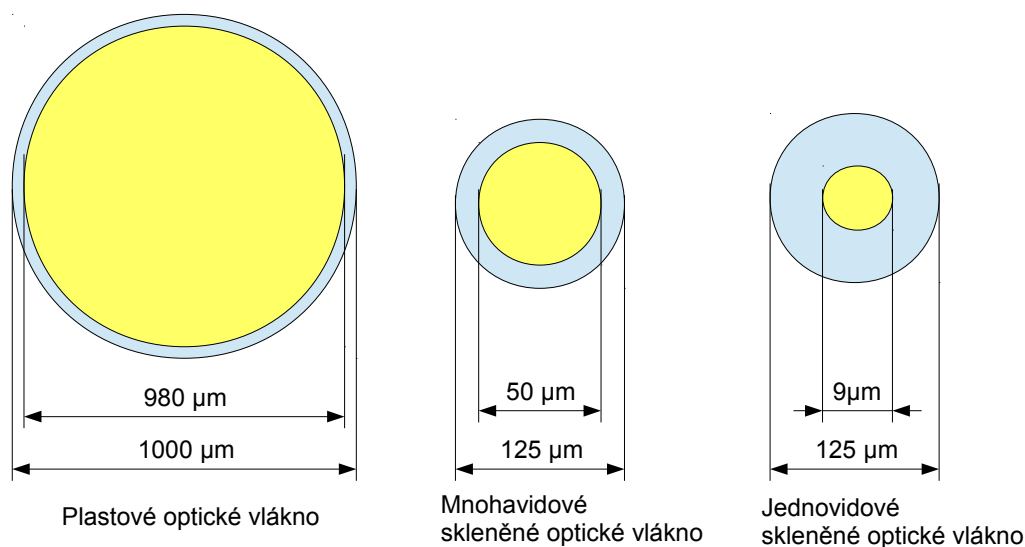
s využitím DMT (Discrete MultiTone) modulace [15]. Výsledků bylo dosaženo s běžně dostupnými komponenty. Zdrojem byla VCSEL laserová dioda s výstupním výkonem 7 dBm na vlnové délce 650 nm. Naměřená šířka pásma byla 2,5 GHz.

Jak je vidět z předchozích poznatků GI-POF vlákna budou převládat v oblasti pro vysokorychlostní přenosy v řádu jednotek, či desítek gigabitů za sekundu. Úspěšným předpokladem je i vývoj vhodných zdrojů záření, které dokáží využít potenciálu GI-POF vlákna. V neposlední řadě je potřeba myslet na cenu, která by neměla přesáhnout cenu řešení na bázi skleněných vláken, v opačném případě nemohou POF vlákna konkurovat.

## 1.5 Srovnání se skleněnými vlákny

Skleněná i plastová optická vlákna využívají stejný princip přenosu informací pomocí optického paprsku, který byl popsán již dříve v kapitole 1.2. Nicméně zde existuje nemálo parametrů které jsou pro každý z uvedených typů vláken typických a určují oblast použití.

Přibližné srovnání rozměrů obou dvou typů vláken je znázorněno na obrázku 1.6. Modrá barva představuje plášť a žlutá jádro vlákna:



Obr. 1.6: Srovnání velikosti průměru POF a vláken na bázi skla

Přehled vlastností, které oba typy vláken sdílí:

- 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.

POF vlákna mají ve srovnání se skleněnými tyto rozdíly [1], [3]:

- Průměr celého vlákna je větší. Jádro a plášť vlákna mají celkový průměr běžně 1 mm, přičemž jádro zaujímá většinu, zhruba 980  $\mu\text{m}$ .
- Útlum je mnohonásobně větší. V současné době se pohybuje od 10 do 200 dB/km v závislosti na použitém materiálu, výrobním procesu, zdroji záření a vhodné vlnové délce. Pro srovnání: běžné jednovidové skleněné vlákno vykazuje při vlnové délce 1310 nm útlum 0,2 dB/km.
- S útlumem je spojena i délka vlákna která je přípustná pro bezchybný přenos. U POF vláken předpokládáme délku přenosové trasy v řádech desítek, max, několik stovek metrů. Většina současných řešení je určena pro přenos na vzdálenost maximálně 100 metrů.
- Práce s POF vlákny nevyžaduje odborných znalostí a speciálních nástrojů (např. při spojování vláken, různé spojky a ukončovací vlákna) jako je tomu u skleněných 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 až 200 °C.
- U POF vláken převažuje duplexní provedení kabelů, konektorů i vysílačů. Znamená to tedy, že přenosový systém používá prostorové dělení komunikace, kdy jedno vlákno je vyhrazeno pro sestupný směr komunikace a druhé vlákno pro vzestupný směr, ve směru od nebo k uživateli. Toto řešení je jednodušší a vzhledem k povaze nasazení POF i dostačující.
- Jako zdroje záření jsou použity levnější LED (Light Emitting Diode) diody.

Z výše uvedeného je patrné, že oblasti využití obou typů vláken jsou až na malé výjimky zřetelně rozdílné. POF vlákna nemají v žádném případě nahradit stávající vlákna na bázi skla. Ty mají především v dálkových, páteřních a vysokokapacitních trasách zcela nezastupitelnou roli.

Naopak, POF budou dominovat v komunikaci na krátkou vzdálenost, v desítkách, maximálně stovkách metrů. Ideální instalace POF vláken je v případě lokálních sítí s provázáním na přístupové sítě.

## 2 PRÁCE S POF

### 2.1 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. Průměr samotného plastového vlákna je kolem 1 mm. Dále je zde vrstva zajišťující ochranou funkci, tloušťka je běžně 1 až 4 mm. Nejčastěji se lze setkat s duplexním provedením, to znamená že pro každý směr přenosu je vyhrazeno samostatné vlákno. Obě tyto vlákna jsou vzájemně spojena a tvoří tak kabel.

Pokud uvažujeme nasazení v lokálních sítích, jsou prostorové nároky přibližně třetinové oproti metalické kabeláži, kterou je v současnosti nejběžnější kategorie Cat5e. POF vlákna mohou být snadno nainstalována ve stejných trasách jako stávající kabelové rozvody, ať již zmíněné Cat5e nebo koaxiální vedení kabelové televize nebo anténního rozvodu v domě.

### 2.2 Konektory a spojování

POF vlákno může být zakončeno mnoha různými konektory, spojky nebo lze vlákno ponechat bez konektoru. 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. Jeden z hlavních požadavků na konektory pro POF vlákna je jednoduchost jejich konstrukce a také snadná instalace bez dalších potřebných nástrojů. Mnohé konektory se již dříve používali v průmyslové automatizaci a pro účely telekomunikace se jen mírně upravily. Spojování několika vláken do jednoho celku se provádí pomocí jednoduchých optických spojek, které se nasunou na obě vlákna.

#### 2.2.1 Přehled konektorů

Mezi běžně dostupné konektory pro POF vlákna patří [3]:

- **Konektor V-pin.** Firemní konektor 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.
- **Konektor FSMA.** Nejvíce je tento typ konektoru rozšířen v průmyslových aplikacích. Jde o oválný, šroubovací konektor z kovu, který je rozebíratelný. Jeho složení a celková konstrukce je komplikovaná. Běžná hodnota útlumu na konektoru je 1,5 dB.

- **Konektor ST.** Má podobné vlastnosti jako konektor FSMA, rozdíl je akorát v poslední části. Ta je u ST konektoru ve tvaru bajonetu a díky tomu našel uplatnění v oblasti plastových a skleněných vláken. Prodává se varianta z plastu nebo kovu.
- **Konektor P/N F07.** Nepříliš rozšířený konektor v duplexním provedení. Je vyroben z plátu a původní určení bylo pro audiosystémy.
- **Konektor Toslink / F05.** Simplexní konektor od společnosti Toshiba, který je velmi rozšířen v audiotechnice pro přenos nekomprimovaného zvuku. Jeho hlavní výhodou je jednoduchá konstrukce. Jde o nerozebíratelný konektor pro POF vlákno o průměru 1 mm.
- **Konektor 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.
- **Konektor SMI.** Duplexní konektor z plastu, který je zahrnut ve standardu IEEE 1394. Hlavní oblast použití je spojení periférií na krátké vzdálenosti v domácích podmínkách.
- **Konektor Versatile-Link.** Jde o vlastní řešení firmy AVAGO, která vyvinula konektor speciálně pro POF vlákna. Celý název zní Versatile Link a jedná se o simplexní konektor velmi jednoduché konstrukce. Složení konektoru je možno pouze se speciálními krimpovacími kleštěmi.
- **Konektor F07.** Konektor doporučovaný dle specifikací ATM Forum. Duplexní provedení, z plastu.

V oblasti konektorů pro POF panuje ještě větší nejednotnost, než u skleněných vláken. Neexistuje jeden typ, který by vyhovoval většině. V průmyslu má každý dodavatel své specifické konektory, to u POF pro telekomunikace běžné není a proto jsou daleko běžnější tzv. bezkonektorová řešení.

### 2.2.2 Bezkonektorová řešení

Výše zmíněné konektory, přestože nabízejí své kvality, nejsou vhodné pro snadnou instalaci, kterou by zvládl i laik. Právě při práci s POF vlákny, resp. při jejich zakončování musíme předpokládat, že jej bude provádět uživatel, který nemá předchozí zkušenosti s optickými vlákny. Právě tento důvod stojí za tím, že výše zmíněné konektory nikdy příliš nerozšířily.

Proto je nejpravděpodobnější, že se bude používat systém zakončení vlákna bez konektoru. Představitelem tohoto řešení je systém OptoLock od firmy Firecomms [13]. Jedná se o nenáročný duplexní systém.

Práce s tímto systémem probíhá následovně:

1. Vlákno se ponechá s ochranou vrstvou, pouze se konec vlákna zběžně zbaví viditelných nečistot.
2. Pomocí jednoduchého nástroje (žiletka v plastové držáku) se odstraní krátký úsek vlákna a tím vznikne přesný rovný řez.
3. Na straně připojovaného zařízení se odstraní krytka optického rozhraní.
4. Obě vlákna se opatrně rozdělí pomocí žiletky.
5. Konce vláken se zasunou do zdířek rozhraní OptoLock.
6. Pomocí posuvné západky se vlákna zajistí proti vytrhnutí.
7. Pokud je světlo navázáno, postup se provede i pro druhou stranu od bodu 1.

Při porovnání s instalací konektorů u metalické kabeláže Cat5e je zde také úspora času a potřebných nástrojů (při použití konektoru RJ-45 je potřeba krimpovacích kleští a jisté znalosti zapojení konektoru). Bezkonektorové řešení se již dnes velmi rozšířilo a v oblasti POF vláken určených pro budování datových sítí je nejvíce podporováno různými výrobci síťových prvků.

V kapitole 4.5.1 je popsán vliv použití různých nástrojů při zakončení vlákna.

## 2.3 Měření

Metodika měření POF vláken vychází ze stávajících postupů pro vlákna skleněná. Vzhledem k odlišnostem popsaných v kapitole 1.5 odpadá několik postupů charakteristicky použitých pouze v kategorii skleněných vláken

Měření optických vláken lze rozdělit podle více kritérií a požadavků. Vzhledem k povaze a předpokládanému užití POF v určitých typech sítí lze očekávat, že hlavní zájem bude zaměřen na tyto druhy měření:

- **Měření útlumu.** Jeden z nejvýznamnějších parametrů optických vláken je útlum. Na základě znalosti útlumu daného vlákna můžeme lépe navrhnout složení sítě. V jiném případě, pokud již máme vlákno delší dobu v provozních podmínkách můžeme lehce rozpoznat poškození vlákna a včas jej vyměnit.
- **Měření šířky pásma (popř. přenosové rychlosti).** Stejně jako útlum, i maximální šířka pásma a přenosová rychlost jsou velmi důležitými parametry POF vlákna. Pomocí měření lze najít část přenosové trasy která nemá dostatečnou kapacitu pro přenos a vlákno nahradit.
- **Měření mechanických vlastností.** Neméně důležité je ověřit chování vlákna při různém mechanickém namáhání. Především různé ohýbání a kroucení může významně ovlivnit přenosové parametry.

Společnost OPTOKON nabízí zařízení která jsou určena přímo pro měření POF vláken. Jsou to jednoduché testery, které mohou snadno ukázat naměřené hodnoty vstupního a výstupního výkonu a útlumu vlákna [16].



## 3 VYŽITÍ POF V PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH

### 3.1 Stávající řešení přístupových sítí

Telekomunikační operátoři musejí v posledních letech řešit stále vzrůstající požadavky na navyšování přenosových kapacit a zajištění dostatečně kvalitní infrastruktury pro moderní síťové služby. Jde o kombinaci tří služeb které se označují jako „Triple play“ (trojitá hra), tedy vysokorychlostní přístup k síti Internet, hlasové služby (VoIP) a televizní vysílání po IP sítích (IPTV). Tyto všechny aplikace si vyžadují nemalé datové kapacity.

Přivedení optického vlákna co nejbližší k zákazníkovi je v současnosti nejdiskutovanější problém tzv. poslední míle. Jde o segment mezi hraničním zařízením poskytovatele, tedy zakončení jeho transportní sítě a prvním zařízením na straně zákazníka (typicky domácí internetová brána popř. směrovač).

Přístupová část sítě operátora může být řešena mnoha způsoby. U nás je stále nejrozšířenější fixní připojení zákazníka prostřednictvím telefonních rozvodů, na kterých je nasazena technologie digitální účastnické přípojky, tzv. DSL (Digital Subscriber Line). Přesto, že přenosové rychlosti, díky zdokonalování modulace dat, dosahují řádově i desítky megabitů za sekundu (např. u varianty VDSL2 lze dosáhnout až 40 Mb/s), kvalitativní parametry přenosu záleží na mnoha faktorech a nelze je zaručit u většiny uživatelů na jakémkoli místě. Z tohoto důvodu je nasazení moderních služeb, jako je IP televize (IPTV) problematické.

Druhou nejrozšířenější přístupovou metodou je využití bezdrátového přenosu v bezlicenčních pásmech 2,4 GHz a 5 GHz. Velkou výhodou tohoto řešení je flexibilita, snadná rozšiřitelnost a v neposlední řadě i cena prvků sítě. Pomocí této technologie lze připojit i uživatele, kteří se nacházejí v lokalitách, kde nejsou jiné technologické možnosti.

Z výše uvedeného vyplývá, že nasazení optických vláken do oblasti přístupových sítí zajistí do budoucna plynulé navyšování kvality stávajících parametrů a nástup nových, moderních služeb, které si zákazníci budou žádat.

### 3.2 Varianty optických přístupových sítí

V současnosti existuje několik různých variant a koncepcí optických přístupových sítí. Základní rozčlenění je podle [1] a [7] následující:

### 3.2.1 Síť typu bod-bod (PTP)

Pro oba směry komunikace je využito samostatně vyhrazené vlákno. Koncový zákazník je přímo spojen s centrálou telekomunikačního operátora. Tato varianta je vůbec nejdražší a proto není ani příliš rozšířená, využívá se především v náročnějších aplikacích a vlastní vlákno si pronajímají především velké firmy a instituce.

### 3.2.2 Síť typu bod-multi bod (PTMP)

Jedná se o postupné větvení sítě pomocí rozbočovačů na menší celky na které jsou připojeni koncoví zákazníci. Sestupný v vzestupný směr komunikace využívá jen jedno vlákno, dochází ke sdílení přenosových prostředků více účastníky a proto je potřeba zavést časové nebo vlnové dělení pásma.

S ohledem na výše zmíněné, je logické, že se v posledních letech dostala do popředí právě varianta bod-multi bod a to hlavně z ekonomického hlediska.

Tuto architekturu je pak možné rozdělit podle toho, jakým způsobem je realizováno samotné rozbočení a větvení sítě:

### 3.2.3 Aktivní optická síť (AON)

Na přenosové trase jsou umístěny aktivně konfigurovatelné prvky sítě, které mohou plnit funkci jak zesilovačů signálu, tak i přístupových bodů. Každý zákazník má samostatně vyhrazený přenosový kanál. Počet takto připojených uživatelů je určen počtem volných portů na straně aktivního prvku (optického prepínače). Výhodou této varianty je prodloužení dosahu sítě na několik desítek kilometrů (přibližně až 80 km). Naopak nevýhodou je kromě vyšších nákladů na infrastrukturu i nutnost zajistit dodávky elektřiny pro aktivní prvky, což může být v jistých oblastech problematické a nákladné.

### 3.2.4 Pasivní optická síť (PON)

Mezi telekomunikačním operátorem a zákazníkem není na přenosové trase žádný aktivní prvek sítě. Místo nich je použito pasivních rozbočovačů signálu, tzv. splitterů, které optický signál dělí v požadovaném poměru. U starších variant je to maximálně 1:32, pro typ sítě GPON (Gigabit PON) lze dosáhnout rozbočení 1:64 a nejnovější 10 Gb/s PON sítě umožňují až 1:256. Distribuce signálu je obvykle na vzdálenost od 10 do 20 km. Hlavní výhodou je snížení nákladů na infrastrukturu, nevýhodou je omezený dosah sítě a dále pak sdílení přenosového kanálu více účastníky a to si žádá nasazení časového (TDM) nebo vlnového (WDM) dělení kanálu. Také je potřeba si uvědomit, že přenosová rychlost PON sítě se dělí mezi jednotlivé připojené jednotky.

Topologie je z podstaty mnohabodová (PTPM), splittery mohou být kaskádně poskládány za sebou. Toto řešení je vhodné do hustě obydlených oblastí s mnoha bočními větvemi. Je ale nutné počítat s tím, že splittery představují vložný útlum trasy závislý na počtu rozbočení. Například pro variantu GPON, třídy B platí, že vložný útlum distribuční sítě nesmí přesáhnout hodnotu 25 dB. Také platí, že se zvyšováním počtu připojených uživatelů se snižuje přenosová kapacita pro jednotlivé uživatele.

### 3.3 Začlenění POF vláken do konceptu FTTX

Koncept FTTX (Fibre to the X), kde písmeno X označuje ukončení optického vlákna, v současnosti představuje nejrozšířenější postup při budování přístupových sítí s využitím optických vláken. Snahou je zakončit optické vlákno co nejbliž zákazníkovi tak, aby mohl být v budoucnu co nejvíce využit potenciál vybudovaných tras. Především se jedná o navyšování šířky přenosového pásma, zkvalitňování přenosových parametrů a nabízení nových, moderních telekomunikačních služeb.

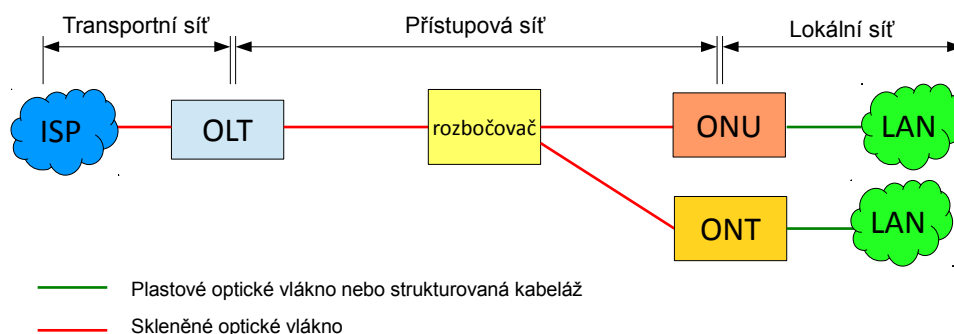
Podle toho, v jakém místě je optické vlákno zakončeno a následně přenos pokračuje po metalickém vedení, rozlišujeme tyto varianty [9], [10]:

- **FTTEx (Fibre to the Exchange)** – jde zřejmě o nejrozšířenější koncept FTTX. Vlákno je ukončeno v ústředně operátora a koncový uživatel je připojen pomocí metalického vedení na kterém je nasazena jedna z technologií xDSL (ADSL, VDSL, SHDSL). Nicméně, jde pouze o částečnou koncepci FTTX z důvodů využití stávajícího metalického vedení k uživateli a to s sebou nese mnohá omezení. Naopak z hlediska ekonomického jde o přijatelný kompromis.
- **FTTC (Fibre to the Curb/Cabinet)** – vlákno je zakončeno v samostatném rozvaděči na veřejném místě. Často je FTTC kombinováno s PON. V tomto konceptu lze snížit náklady na infrastrukturu a do budoucna, pokud se rozšíří POF vlákna i pro venkovní užití na krátké vzdálenosti, ještě více ušetřit na rozvodech k zákazníkům.
- **FTTB (Fibre to the Building)** – tento koncept je v současnosti velmi populární především u bytových a vícepodlažních objektů. Vlákno je ukončeno v prvku umístěném např. v suterénu budovy a společně se směrovačem tvoří hraniční bod lokální sítě. Vlákna POF zde představují ideální oblast využití, jelikož mohou nahradit strukturovanou kabeláž ve vertikálních rozvodech do jednotlivých pater budovy. Například u bytových domů by se ušetřily nemalé náklady za optické konvertory.
- **FTTO (Fibre to the Office)** – Podobné řešení jako FTTB, ale vlákno je zavedeno až do specifických prostor ke konkrétnímu zákazníkovi.

- **FTTH (Fibre to the Home)** – Nejdiskutovanější koncepce 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. Více se lze dočíst v části 3.5.
- **FTTD (Fibre to the Desk)** – jde o nejnovější a nejméně rozšířené pojetí konceptu FTTX. Zákazník je vybaven zařízením, které samo o sobě dokáže zakončit optické vlákno a dále připojit další koncová zařízení.

### 3.4 Topologie optické přístupové sítě

Vlákna POF vykazují vysoký měrný útlum, proto je nelze nasadit na dlouhé 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 3.1 .



Obr. 3.1: Návrh přístupové sítě s využitím skleněných a POF vláken.

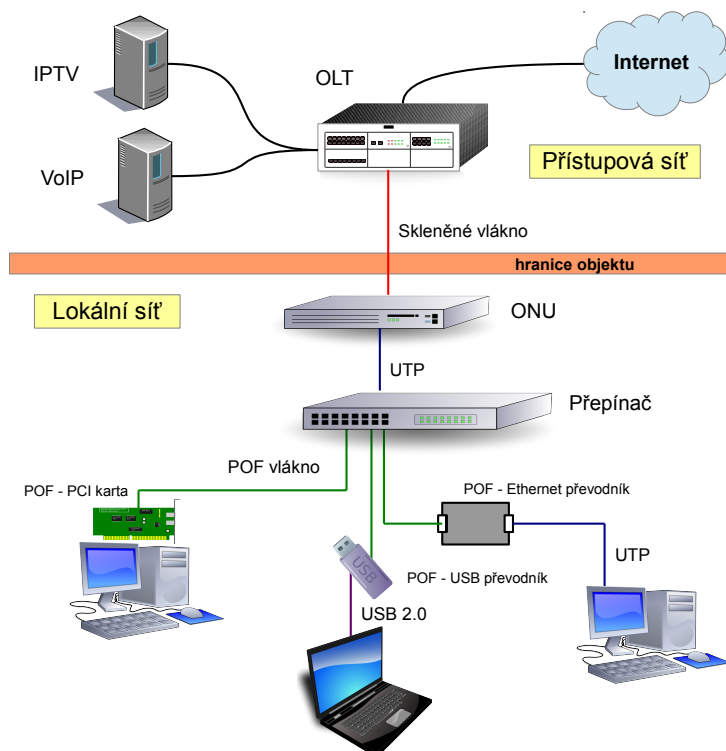
Návrh přístupové sítě je složen z těchto celků:

- 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).

### 3.4.1 Varianta FTTH

Uvažované schéma sítě FTTH využívající POF vlákna na rozhraní přístupové a lokální sítě zobrazuje obrázek 3.2.



Obr. 3.2: Síť FTTH s využitím POF vláken v lokální síti.

Jak již bylo zmíněno dříve, varianta FTTH představuje zakončení vlákna přímo v objektu zákazníka, nejčastěji představující samostatný dům. Tento typ přípojky se postupně rozšiřuje i v naší zemi, především v novější zástavbě domů. Hlavním argumentem budování FTTH sítí je, že všechny výhody, plynoucí z optických sítí jsou přivedeny nejbližší k uživateli a ten následně může plně využívat všech výhod, jako je velká šířka pásma, nízká odezva a vysoké přenosové rychlosti.

Na tomto místě je také dobré zmínit rozmach pasivních optických sítí (PON), zmíněných v části 3.2.4, které mohou velice urychlit budování FTTH sítí ve větším měřítku. Do budoucna je možné předpokládat nárůst přenosových rychlostí na straně přístupových sítí až na několik gigabitů za sekundu. Například varianta pasivní sítě 10GEPON, standard IEEE 802.3av, předpokládá symetrické rychlosti až 10/10 Gb/s [7].

Na straně uživatele, v místě kde přístupová část přechází na lokální síť může docházet k efektu úzkého hrdla. Tuto situaci lze reálně do budoucna předpokládat. Zejména trend v poskytování audiovizuálního obsahu, konkrétně 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 popsanému problému [8].

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.

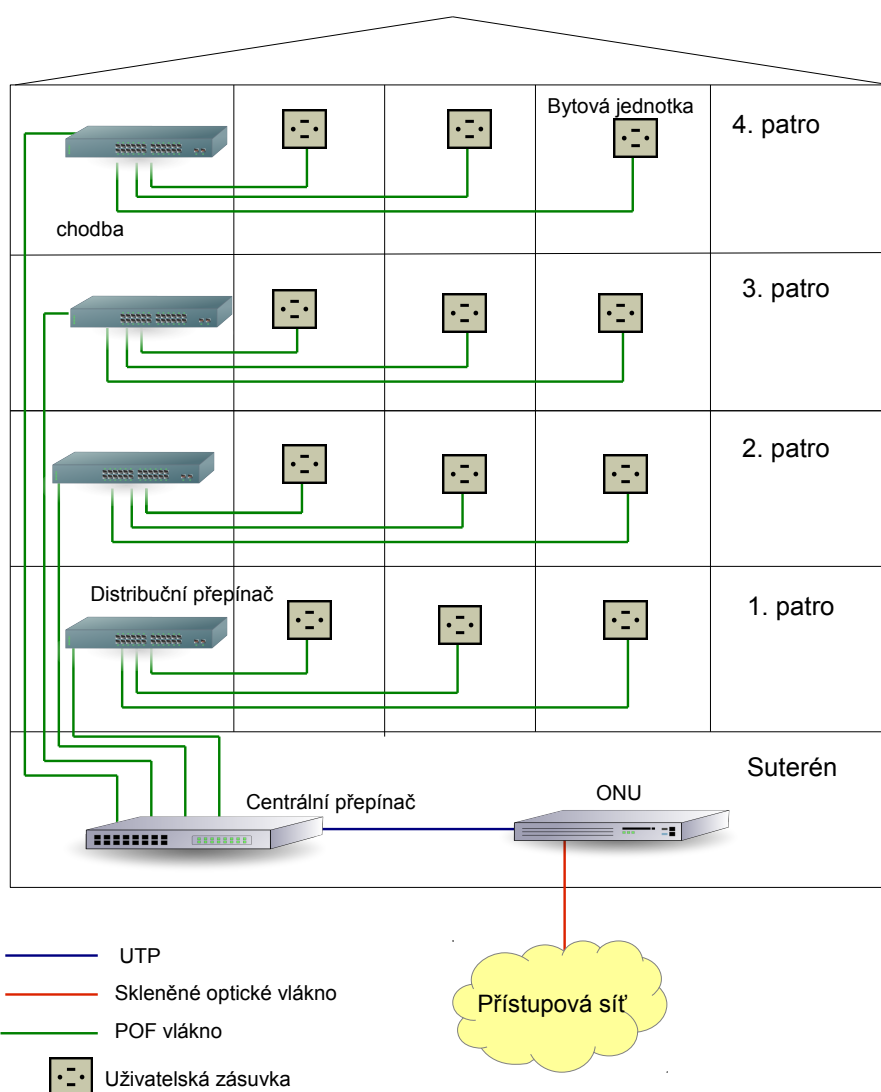
Modelový návrh sítě s POF vlákny je uveden v kapitole 4.

### 3.4.2 Varianta FTTB

Koncept FTTB je v základu podobný FTTH, rozdíl je, že u FTTB je více segmentů sítě a tím i delší vzdálenosti k centrálnímu bodu sítě. Ve většině případů se jedná o topologii typu hvězda. Centrální přepínač je umístěn blízko jednotky ONU a může

sloužit i jako prvek starající se o konfiguraci sítě, logické rozdělení sítě pomocí VLAN (Virtual LAN) nebo řízení kapacit sítě na základě pravidel QoS (Quality of Service). Koncept FTTB je zamýšlen především ve vícepatrových a členitějších objektech, proto je potřeba použít dalších přepínačů k připojení koncových uživatelů.

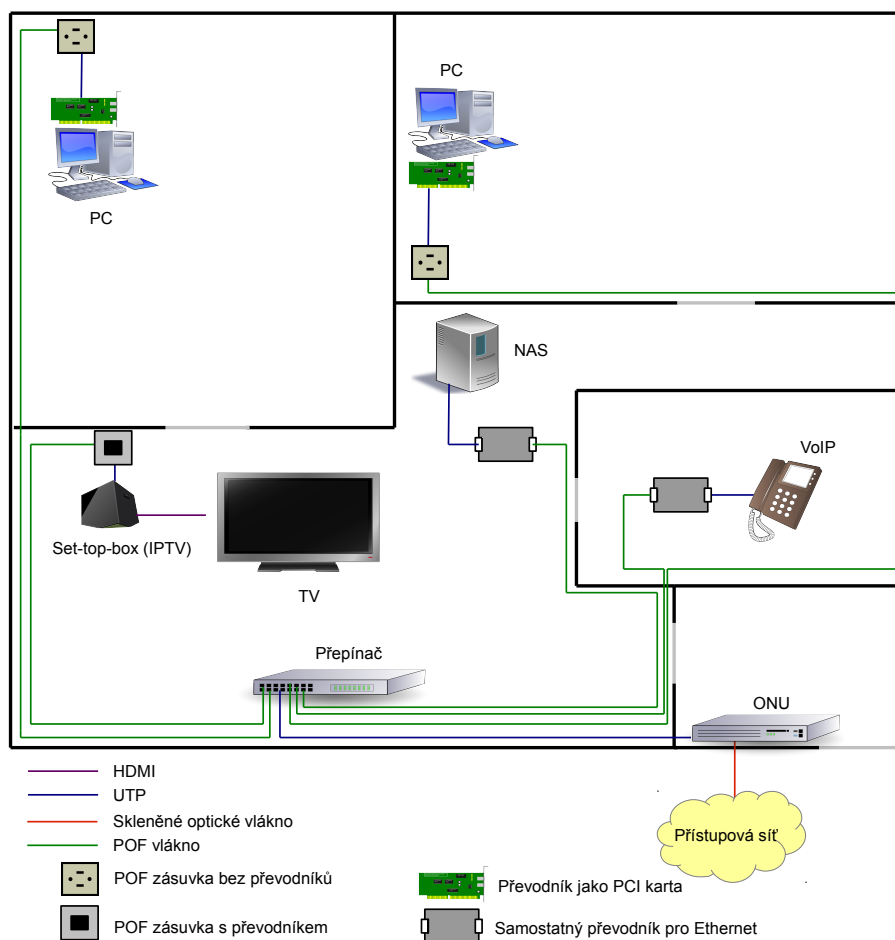
Na sledujícím schématu 3.3 je vyobrazeno použití POF vláken v konceptu FTTB u čtyřpatrové budovy. Topologie sítě je stromová s rozdělením na páteřní a distribuční trasu. Pokud vzdálenost jednotlivých zásuvek k centrálnímu přepínači nepřesáhne vzdálenost 100 metrů, není potřeba jednotlivých přepínačů v každém patře.



Obr. 3.3: Schéma sítě FTTB s využitím POF vláken v lokální síti.

### 3.5 Domácí a lokální sítě

Zatímco obrázek 3.2 ukazoval obecný návrh varianty FTTH s POF vlákny, v následujícím schématu 3.4 je konkrétní rozvržení lokální sítě řešené pomocí POF vláken v domě:



Obr. 3.4: Lokální síť s POF a napojením na přístupovou síť.

Na schématu je jednopodlažní dům se třemi menšími a jedním větším pokojem. Domácnost je připojena k přístupové síti pomocí jednotky ONU, v tomto případě předpokládáme, že je kombinována se směrovačem, který zajišťuje směrovací a bezpečnostní funkce a další služby v lokální síti.

Centrálním bodem je přepínač který je s ONU propojen standardním kabelem UTP (Unshielded Twisted Pair, nestíněný kroucený pár). Koncová zařízení (počítače, VoIP telefon a televize) jsou k přepínači připojeny vláknem POF které nepřesahuje 100 metrů pomocí topologie hvězda. V místnosti s koncovým zařízením je



POF vlákno zakončeno v opto-elektrickém převodníku. Převodník může mít podobu samostatné jednotky s rozhraním RJ-45 pro Ethernet, USB jednotky která je napájena přímo ze sběrnice USB a nebo interní karty do sběrnice PCI. Následuje UTP kabel který zajišťuje připojení uživatelského zařízení.

V tomto návrhu lze výhodně využít těchto vlastností POF vláken:

- Vzhledem k malým prostorovým nárokům, se mohou vlákna POF nainstalovat za lišty které vedou kolem zdí, popř. za okraje koberce.
- Pokud stavba nedisponuje již zavedenými datovými rozvody, lze využít elektrické rozvody 230 V. Toto řešení ušetří nutnost dodatečných stavebních úprav a také možnost vlákno vést a zakončit vedle stávajících elektrických zásuvekách.
- POF vlákno je vhodné ukončit v datové zásuvce a podle potřeby kdykoli napojit další vlákno. Existují také varianty, kdy je zásuvka rozšířena o převodník z optického na elektrický signál a napájení je přivedeno ze stávajících rozvodů. Další výhodou je že tento typ zásuvek může obsahovat i více konektorů jak pro vlákna, tak pro strukturovanou kabeláž. To se velmi hodí např. při napojení počítače a televize na jednom místě v domě.

### 3.6 Porovnání parametrů POF s metalickou kabeláží

V segmentu domácích sítí je kladen důraz na jednoduchost, flexibilitu a nízkou cenu koncových zařízení a to hlavně kvůli tomu, že si uživatel veškeré prvky sítě pořizuje sám. Poskytovatel internetového připojení vlastní většinou pouze zařízení které zakončuje přístupovou síť (ONU).

Většina domácností využívá, vedle klasické strukturované kabeláže čím dál častěji i bezdrátového přístupu k síti (WLAN). Tento způsob připojení se rozšířil především díky komfortu, který přináší a také vzhledem k nárůstu počtu mobilních zařízení (notebooky, mobilní telefony, atd.) v domácnostech. Na druhou stranu, kvůli omezené šířce pásma a sdíleným kmitočtům, nelze pomocí WLAN sítí vybudovat dostatečnou kapacitu pro multimediální služby.

Proto se často uživatelé vracejí k běžným metalickým rozvodům. V tomto ohledu je nejpoužívanější technologie Ethernet, konkrétně varianta 100Base-T (Fast Ethernet) nebo 1000Base-T (Gigabit Ethernet) na kabeláži UTP, kategorie 5 (Cat5), 5e (Cat5e), popř. 6 (Cat6) [14].

Z pohledu POF vláken jsou domácí sítě ideální segment využití. Argumenty hovořící pro jsou:

- Nízká výrobní cena POF vláken. Výroba a zajištění materiálu pro POF vlákna je levnější než pro metalické kabely, časem lze tady předpokládat, že ceny POF

vláken klesnou pod cenu metalických kabelů. Podobá situace panovala již dříve u vláken na bázi skla.

- POF vlákna mají menší průměr než čtyř párové UTP kabely. Proto lze plastová vlákna dodatečně zavést i v objektech kde se původně s datovými rozvody nepočítalo nebo je stávající metalická kabeláž již nevyhovující. Optické vlákno není ovlivňováno vnějším elektromagnetickým polem a tak lze využít stávající silové rozvody aniž by hrozila interference.
- Lze předpokládat, že koncepce metalického vedení v segmentu domácích sítí je na vrcholu svých možností a nelze již dále vylepšovat parametry přenosu. POF vlákna je možné používat pro několik různých konceptů a s výhledem do budoucna časem měnit určité parametry k lepšímu.

Naopak, nevýhody lze charakterizovat takto:

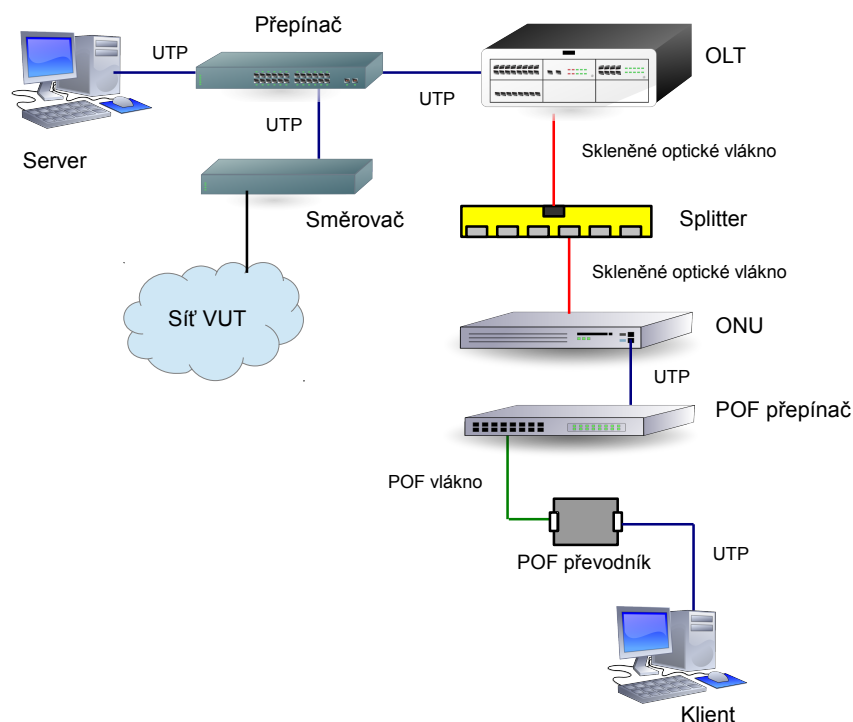
- Podpora rozhraní pro POF vlákna ze strany koncových zařízení, jako jsou osobní počítače, notebooky, nebo multimediální systémy je zatím velmi omezená a v současné době si vyžádá dalších investic do převodníků mezi optickým a elektrickým signálem za využití rozhraní Ethernet nebo USB.
- Efektivnost financí vzhledem k technologickému vylepšení je diskutabilní. Nelze předpokládat brzký nárůst nabídky služeb, které by využili potenciálu POF vláken v plném rozsahu. K šíření televize ve vysokém rozlišení stačí za určitých podmínek i stávající rozvody kabeláže typu Cat5e.
- Parametry, které nyní nabízejí klasické metalické rozvody jsou natolik dostatečné, že není důvod k přechodu na plastová vlákna. Současná strukturovaná kabeláž typu Cat5e poskytuje rychlost 1 Gb/s, naproti tomu dodavatelé řešení čistě na bázi POF vláken většinou poskytují zařízení jen pro rychlosti 100 Mb/s. V tomto ohledu je také důležité zmínit, že cena POF vláken a aktivních prvků, které je využívají je stále vysoká a v současné době klesá jen velmi pomalu.

Z výše uvedeného vyplývá, že nasazování POF vláken do LAN sítí domácího charakteru bude mít spíše postupný charakter. Do nových staveb lze POF vlákna doporučit již nyní, nicméně vždy záleží na podrobnějších aspektech dalších provází. Například propojení přístupové a lokální sítě jedinou technologií která by využívala POF vláken. Tím by se vytvořil ucelený koncept FTTH popř. FTTB.

## 4 TESTOVACÍ POLYGON

Tato kapitola zahrnuje návrh a realizaci testovacího polygonu s POF vlákny v laboratoři přenosových médií na Ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně. Hlavním cílem je praktické ověření teoretických předpokladů, které byly uvedeny v předchozích kapitolách a také praktická ukázka využití v podmínkách přístupových a lokálních sítí.

Obrázek 4.1 ukazuje konkrétní zapojení:



Obr. 4.1: Testovací polygon s využitím POF vláken.

### 4.1 Aktivní prvky

#### 4.1.1 Jednotka ONU

Jednotka v síti představuje způsob připojení lokální sítě k přístupové síti operátora. Konkrétně byl použit model E8010U od společnosti OverTek [19]. Jde o optickou zakončovací jednotku (ONU) určenou pro pasivní optickou síť GEAPON (standard IEEE 802.3ah). Optické rozhraní je prezentováno SC konektorem (simplexní provedení) a

využívá vlnovou délku 1310 nm pro odesílání dat a 1490 nm pro příjem dat. Připojení k lokální síti zajistí jeden gigabitový metalický port standardu 1000Base-T. Zařízení podporuje pokročilé síťové konfigurace, jako je VLAN, QoS, IGMP snooping a nastavení šířky pásma. Problémem této ONU jednotky je, že nedisponuje žádným optickým POF portem, proto je nutné propojit ONU a POF přepínač metalickým UTP kabelem.

### 4.1.2 Jednotka OLT

Zařízení OLT je umístěno na straně poskytovatele telekomunikačních služeb. Slouží k ukončení optické trasy a zároveň řídí datový provoz v síti PON. V tomto testovacím polygonu bude ONT simulovat služby IPTV a datového propojení k síti Internet. V polygonu byla použita ONT jednotka výrobce OverTek, model E8110T [18].

V základu se jedná o GEAPON Layer-2 optický přepínač, který dokáže distribuovat signál až pro 32 jednotek ONU. Použité vlnové délky jsou: 1310 nm pro vstupný směr a 1490 nm pro sestupný směr, bráno z pohledu koncového zařízení. Pro připojení na páteřní síť je přítomen gigabitový port standardu 1000Base-T pro metalickou kabeláž a gigabitový optický slot pro rozšiřující moduly SFP (Small form-factor pluggable transceiver). Síť PON je připojena pomocí SC konektoru v provedení WDM. Také je přítomen standardní 10/100 Mb/s Ethernet port pro správu zařízení a konzolový port pro správu pomocí terminálu. Optický přenos je možný do vzdálenosti 20 km při maximálním vložném útlumu 20 dB a přenosové rychlosti až 1,25 Gb/s.

Mezi síťové parametry zařízení patří podpora virtuálních lokálních sítí IEEE 802.1q VLAN (Virtual Local Area Network), řízení kvality služeb QoS (Quality of Service), řízení multicastové komunikace, řízení toku dat podle MAC adresy. Zařízení se spravuje přes konzoli nebo pomocí dodávané grafické aplikace.

Mezi OLT a ONU byl zapojen optický rozdělovač (tzv. splitter), který dělí signál v poměru 1:8.

### 4.1.3 POF přepínač

Jedná se o POF přepínač od společnosti OPTOKON, model OPSW-24-OL2, jehož hlavní přednosti jsou podpora tří navzájem různých typů rozhraní. Toto zařízení disponuje pokročilými síťovými funkcemi, jako je VLAN a QoS, které mohou být užitečné při poskytování náročnějších služeb, například IPTV. Celkem 24 OptoLock portů 100Base-TX POF rozhraní je určeno pro připojení uživatelských síťových zařízení, jako je osobní počítač nebo VoIP telefon. Samozřejmě je možné připojit další POF přepínač.

Dále je v zařízení dvakrát gigabitový metalický port standardu 1000Base-T. Je možné je využít více způsoby, jednak zde může být připojeno náročnější zařízení, které vyžaduje přenos o rychlosti 1 Gb/s, například server a nebo může být využito pro připojení k zakončovací jednotce ONU.

Druhá dvojice gigabitových portů je standardu 1000Base-SX/LX (optický modul je dodáván zvlášť), určených pro konvenční optická vlákna na bázi skla. Přítomnost tohoto rozhraní je velkou výhodou z hlediska začlenění do přístupové optické sítě. Například lze připojit vzdálenější segment sítě, kde by plastová optická vlákna nemohla být nasazena. Konfigurace probíhá jednoduše pomocí webového rozhraní. V něm je také možné sledovat a nastavovat všechny funkce zařízení.



Obr. 4.2: POF přepínač OPTOKON OPSW-24-OL2.

#### 4.1.4 POF převodník

Vybrán byl model CS-POF-OL2 který je malých rozměrů a vyžaduje napájení 5 V. Zařízení slouží jako jednoduchý opto-elektrický převodník signálu. Optické rozhraní je řešeno bez konektorovou technologií OptoLock. Metalická část je standardní Fast Ethernet o rychlosti 100 Mb/s (norma IEEE 802.3u) s konektorem RJ-45.

#### 4.1.5 Počítač typu server

V polygonu je umístěn jeden počítač, který bude provozován jako server síťových služeb. V rámci tohoto zařízení lze simulovat situace v reálné síti a vyhodnocovat jejich parametry. Jako ideální testovací oblast se jeví multimediální služby typu televize a hlas v IP síti, kde je potřeba zajistit kvalitu služby (QoS) a velmi malé zpoždění. Zejména u IPTV je také vyžadována velká šířka pásma.

#### 4.1.6 Počítač typu klient

Tato stanice bude sloužit k vyhodnocování kvality služeb, které budou provozovány na straně serveru.

## 4.2 POF vlákno

V rámci polygonu bylo použito simplexní provedení POF vlákna a to pouze u měření s přípravkem OPTEL. V ostatních případech bylo použito POF vlákno duplexního provedení se skokovou změnou indexu lomu (SI-POF) z polymethyl-metacrylátu. Útlum signálu je přibližně 200 dB/km při vlnové délce 650 nm, numerická apertura (NA) je 0,5. Průměr jádra je 0,980 mm a pláště 1 mm, ochranu vlákna tvoří vrstva 2,2 mm polyethylenu. Více v dokumentu [20].

## 4.3 Zapojení polygonu

Polygon v laboratoři lze rozdělit na dvě části. První část je osazena v racku (stojanu), kde je umístěno technologické vybavení přístupové sítě z pohledu operátora: jednotka OLT, přístupový přepínač a směrovač a veškerá kabeláž a optická vlákna. Druhá část je umístěna mimo rack: jednotka ONU, POF přepínač a POF převodník popř. POF zásuvka.

V laboratoři lze druhou část sítě realizovat různě. Např. na pracovním stole bude společně umístěna jednotka ONU, do které bude přivedeno skleněné vlákno z racku, nebo může být POF přepínač umístěn v racku a ke stolu přivedeno plastové vlákno zakončené v POF zásuvce. Pokud by za zásuvkou následovalo zařízení s rozhraním pro POF vlákna, můžeme tak simulovat koncept „optika až na stůl“.

Na následující fotografii 4.3 je zobrazeno uspořádání ve stojanu v laboratoři. Popis je následující: nahoře vlevo – směrovač pro připojení OLT k páteřní síti, uprostřed – přepínač, do kterého je připojen směrovač a stanice označená jako Server, dole – jednotka OLT.



Obr. 4.3: Zapojení části testovacího polygonu ve stojanu.

## 4.4 Měření síťových parametrů

### 4.4.1 Testování IPTV

Do jednotky OLT byl připojen počítač, který simuloval zdroj vysílání ve vysokém rozlišení HDTV. Na druhé straně byl připojen druhý počítač, který představoval počítač, nebo televizi za set-top-boxem zákazníka. Pomocí programu VideoLAN VLC bylo přes celou síť zasíláno unicastové vysílání pomocí protokolu RTP (Real-time Transport Protocol).

Při přenosu nebyly pozorovány žádné významnější chyby, nicméně, v reálném prostředí se předpokládá distribuce pro desítky až stovky účastníků, proto je třeba počítat s vyššími nároky na síťové prvky.

### 4.4.2 Měření zpoždění signálu

Testovaná síť byla zapojena podle schématu 4.1. Následně bylo na počítači, který je označen jako Server spuštěn příkaz programu ping, který zasílal ICMP (Internet Control Message Protocol) *echo request* pakety na druhý počítač, označený jako Klient. Tímto způsobem lze stanovit zpoždění mezi odesláním a přijetím paketů při průchodu sítí. Test byl zopakován i v opačném směru, tedy z Klienta na Server.

Výsledné hodnoty se průměrně pohybují kolem 4 ms, což je velmi nízká hodnota a lze tak říci, že zařazení POF aktivních prvků do optické sítě FTTH nedojde k nárůstu zpoždění při přenosu dat.

## 4.5 Měření mechanických a přenosových parametrů

### 4.5.1 Vliv nástrojů na kvalitu zakončení konce vlákna

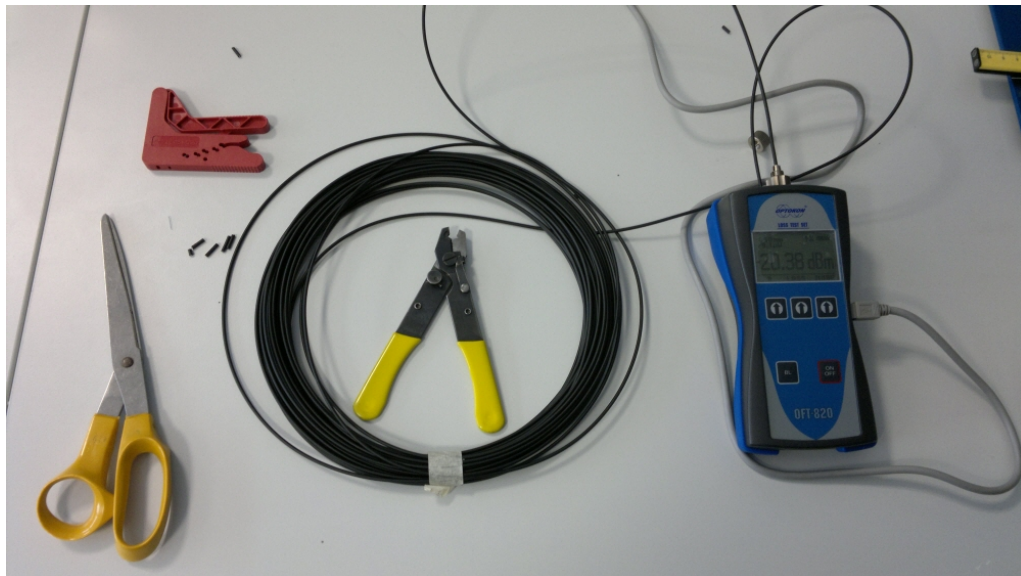
Cílem tohoto testu bylo určit, jak se projeví vliv použití různých nástrojů na povrch konce POF vlákna, při jeho zakončení. Vybrány byly tři nástroje, u kterých se předpokládá přítomnost při práci s POF. Je to: řezačka s žiletkou určená pro POF vlákna, krimpovací kleště určené pro odstranění primární ochrany skleněných vláken a nůžky na stříhání papíru. Do měřicího přístroje OPTOKON OFT-820, který sloužil zároveň jako zdroj i detektor záření bylo připojeno simplexní POF vlákno o délce 20 metrů. Vzhledem ke krátké vzdálenosti můžeme útlum vlákna zanedbat.

V následující tabulce 4.1 jsou uvedeny hodnoty úrovně přijímaného optického signálu. Každé měření bylo provedeno třikrát.

Tab. 4.1: Úrovně signálu pro různé nástroje použité při zakončení POF vlákna

	Řezačka POF vláken	Krimpovací kleště	Nůžky na papír
1.	-14,86 dBm	-20,38 dBm	-16,09 dBm
2.	-12,89 dBm	-19,82 dBm	-17,55 dBm
3.	-14,26 dBm	-16,98 dBm	-20,56 dBm
Průměr	-14,00 dBm	-19,06 dBm	-18,06 dBm

Z hodnot výše lze odvodit, že nejvhodnější nástroj pro práci s vlákny je speciální řezačka POF vláken. Při použití nůžek na papír popř. krimpovacích kleští dojde k nárůstu útlumu přibližně o 4 dB (nůžky) nebo 5 dB (kleště) oproti řezačce, kterou doporučují výrobci POF kabelů a proto ji lze brát jako nejvhodnější v tomto měření. Nástroje, POF vlákno i měřicí přístroj jsou zobrazeny na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Zakončení POF vlákna pomocí různých nástrojů.

#### 4.5.2 Stanovení útlumu optické spojky

Optická spojka (vyobrazená na fotografii 4.5) se používá k prodloužení dvou samostatných délek vlákna, nebo ji lze zakomponovat do standardní datové zásuvky a mít tak pohodlný přístup ke konci POF vlákna. Jelikož v době měření nebyla k dispozici zásuvka pro POF vlákna, lze měření na spojce považovat za rovnocenné vzhledem k zásuvce, která plní podobnou funkci jako spojka.

Z předchozího měření vezmeme hodnotu  $-14,00$  dBm jako referenční bez spojky. Zapojení zůstává stejné, akorát je před detektor záření vložena duplexní spojka





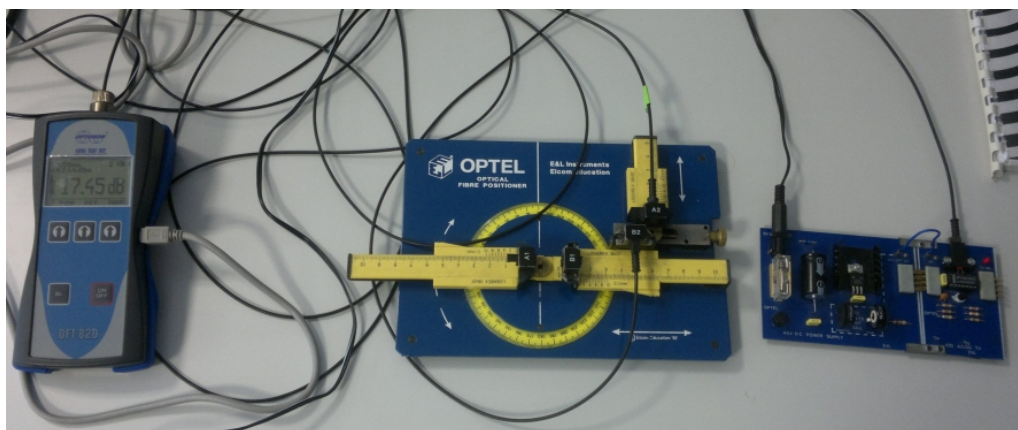
Obr. 4.5: Duplexní spojka typu OptoLock.

a zhruba 30 cm POF vlákna, jehož útlum zanedbáme. Naměřená úroveň signálu se spojkou byla po provedení třech měření průměrně  $-16,50$  dBm. Útlum spojky samotné je tedy 2,50 dB.

Z výsledků lze vyvodit, že útlum jedné spojky nebude mít významný vliv na optický přenos. Použití několika spojek už může mít za následek snížení maximálního dosahu přenosu.

### 4.5.3 Přípravek OPTEL

Měření bylo provedeno na přípravku OPTEL, který je určen pro měření parametrů optického přenosu s plastovými vlákny a umožňuje k samotnému přípravku volitelně připojovat další moduly, jako např. zdroj záření, filtry a modulátory. Ve všech následujících testech s přípravkem OPTEL byl použit modulární zdroj s diodou LED který vyzařoval viditelné světlo s vlnovou délkou 650 nm. Jako detektor byl použit přístroj OPTOKON OFT-820. Zapojení je zobrazeno na fotografii 4.6.



Obr. 4.6: Zapojení pracoviště s přípravkem OPTEL.

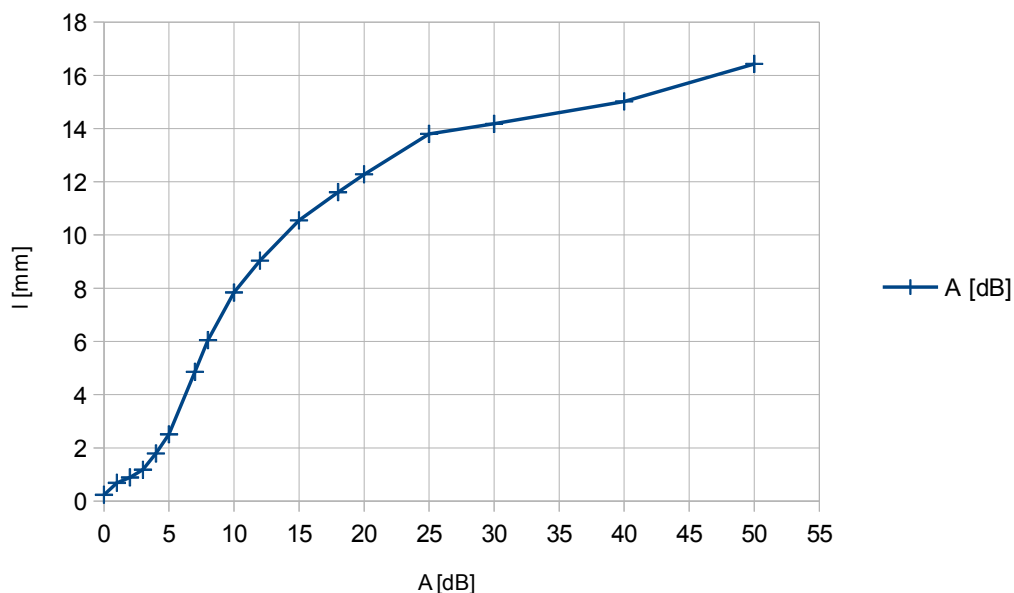
## Oddalování konců vláken

Při tomto testu je simulována situace, kdy dva konce POF vláken nedoléhají přímo, ale je mezi nimi mezera vyplněná vzduchem. To může nastat například při nedokonalé instalaci vláken v optickém portu typu OptoLock. V následující tabulce 4.2 jsou uvedeny hodnoty útlumu (A) prakticky změřené při navyšování mezery mezi vlákny (l). V grafu 4.7 je vidět přibližně exponenciální nárůst útlumu.

Z výsledků je patrné, že je potřeba důsledné upevnění konektorů ve spojce, jelikož již mezera 5 mm způsobí útlum 2,51 dB, což je zhruba hodnota útlumu samotné OptoLock spojky (viz dříve).

Tab. 4.2: Závislost útlumu na oddalování konců vláken.

l (mm)	A (dB)	l (mm)	A (dB)	l (mm)	A (dB)
0	0,24	7	4,86	20	12,28
1	0,69	8	6,05	25	13,80
2	0,89	10	7,84	30	14,18
3	1,18	12	9,04	40	15,02
4	1,79	15	10,55	50	16,43
5	2,51	18	11,61		



Obr. 4.7: Graf závislosti útlumu optického výkonu na oddalování vláken.

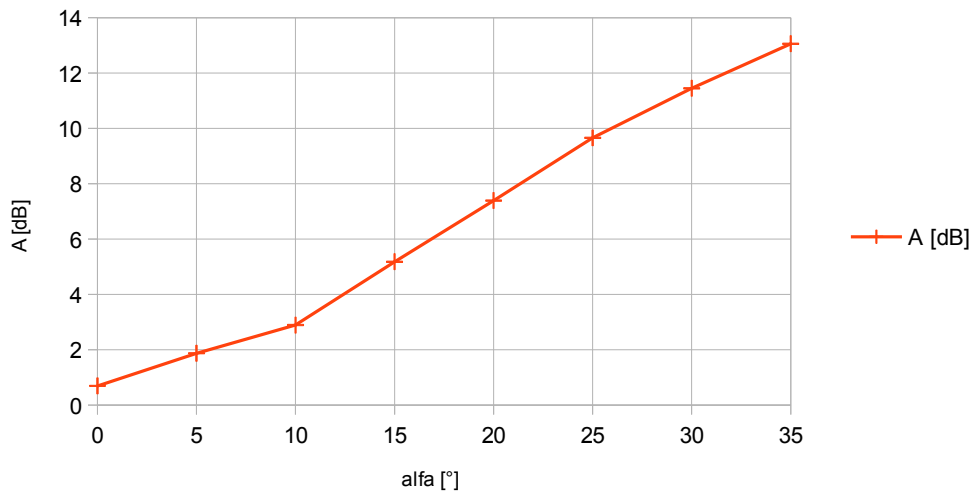
### Úhlová odchylka konců vláken

Podobná situace, jako u předchozího testu, nyní však dochází k vychylování jednoho vlákna vůči druhému pod určitým úhlem  $\alpha$ . Jeden konec vlákna byl pevně upevněn v přípravku a druhým koncem se pohybovalo do stran. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 4.3 a graf je následně sestaven na obrázku 4.8.

Závislost je přibližně lineární. Do hodnoty úhlu  $5^\circ$  lze útlum považovat za zanedbatelný. V praxi se tento typ ztrát zřejmě bude vyskytovat zřídka.

Tab. 4.3: Závislost útlumu na úhlové odchylce konců vláken.

$\alpha$ ( $^\circ$ )	A (dB)
0	0,69
5	1,87
10	2,89
15	5,18
20	7,39
25	9,66
30	11,45
35	13,06



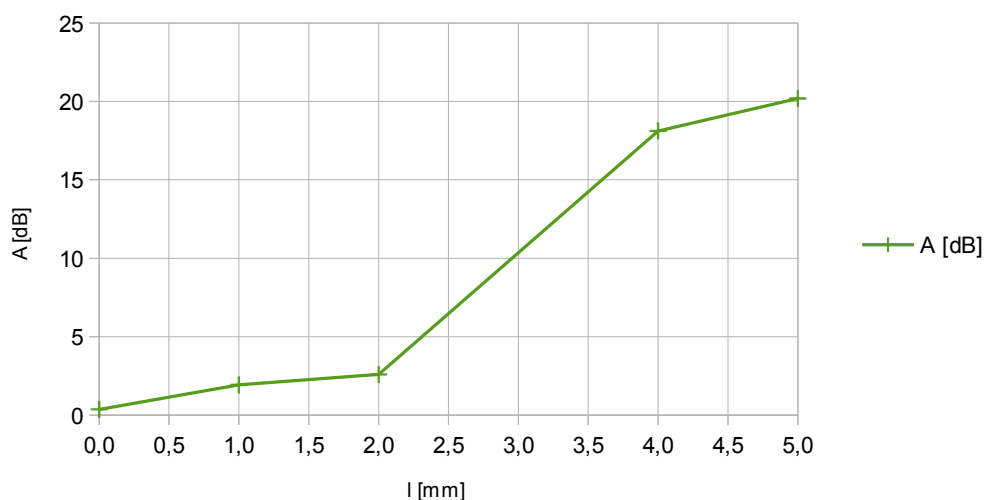
Obr. 4.8: Graf závislosti útlumu optického výkonu na úhlové odchylce.

### Příčná odchylka konců vláken

K tomuto typu ztrát dochází pokud nejsou konce vláken v přímé rovině proti sobě, tudíž jsou vychýleny podle příčné osy. Přibližně od hodnoty 2 mm (podle tabulky 4.4) nastává výrazný útlum signálu, jelikož je většina světla vyzářena mimo vlákno do okolí a optický přenos je tak velmi narušen. Graf 4.9 ukazuje tento prudký nárůst v rozmezí 2 až 4 mm.

Tab. 4.4: Závislost útlumu na příčné odchylce konců vláken.

l (mm)	A (dB)
0	0,37
1	2,59
2	2,89
4	18,12
5	20,20



Obr. 4.9: Graf závislosti útlumu optického výkonu na příčné odchylce.

### 4.5.4 Makroohyby vlákna

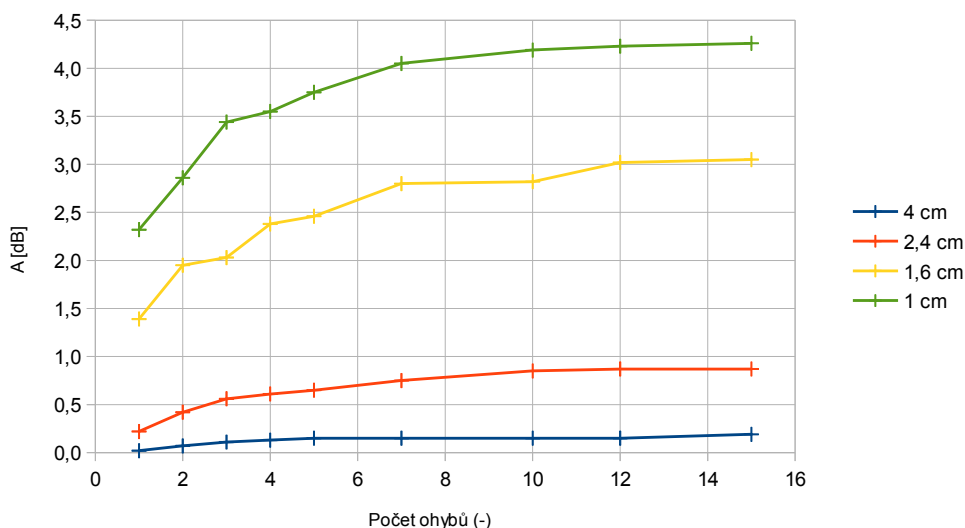
Ohýbání optického vlákna vede ke vzniku makroohybů, což je jeden ze dvou typů ohybů. Makroohyby mají poloměr ohybu větší, než je vlákno samotné. Ztráta optického signálu je způsobena tím, že v místě ohybu, není splněna podmínka úplného odkazu paprsku a část energie je vyzářena mimo jádro do pláště, kde je pohlcena.

Při této zkoušce bylo cílem zjistit, do jaké míry je možné POF vlákno namáhat ohyby a jaký to bude mít vliv na přenos světla ve vlákně. Vycházelo se z předpokladu, že plastová vlákna by měla vydržet zhruba stejné mechanické namáhání jako běžná strukturovaná kabeláž a daleko více než skleněná vlákna.

V našem případě je POF vlákno ohýbáno okolo válců s průměry 4, 2,4, 1,6 a 1 cm, postupně jsou přidávány ohyby a na detektoru je odečítána hodnota útlumu v dB. Nejprve byla stanovena referenční úroveň signálu na detektoru  $-10,87$  dBm při 650 nm, což je hodnota při které bylo vlákno bez ohybů, volně položeno. Následně bylo provedeno současně 1 až 15 ohybů (viz tabulka 4.5) na válcích výše uvedených průměrů. Po každém ohýbání bylo vlákno znovu narovnáno.

Tab. 4.5: Závislost útlumu na průměru ohybu a počtu ohybů.

Počet ohybů a útlum (dB)		1	2	3	4	5	7	10	12	15
Průměr (cm)	4	0,02	0,07	0,11	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15	0,19
	2,4	0,22	0,42	0,56	0,61	0,65	0,75	0,85	0,87	0,87
	1,6	1,39	1,95	2,03	2,38	2,46	2,80	2,82	3,02	3,05
	1	2,32	2,86	3,44	3,55	3,75	4,05	4,19	4,23	4,26



Obr. 4.10: Graf závislosti útlumu na poloměru ohybu a počtu ohybů.

Z výsledků a průběhů ve grafu 4.10 je patrné, že výraznější nárůst útlumu začíná při poloměru ohybu 1,6 a 1 cm. Jak uvádí dodavatel POF vlákna [20], útlum by měl být maximálně 0,5 dB při poloměru ohybu 2,5 mm. Podle výše uvedené tabulky je při

podobném ohybu 2,4 mm útlum 0,22 dB. Parametry uvedené výrobcem s rezervou odpovídají skutečnosti.

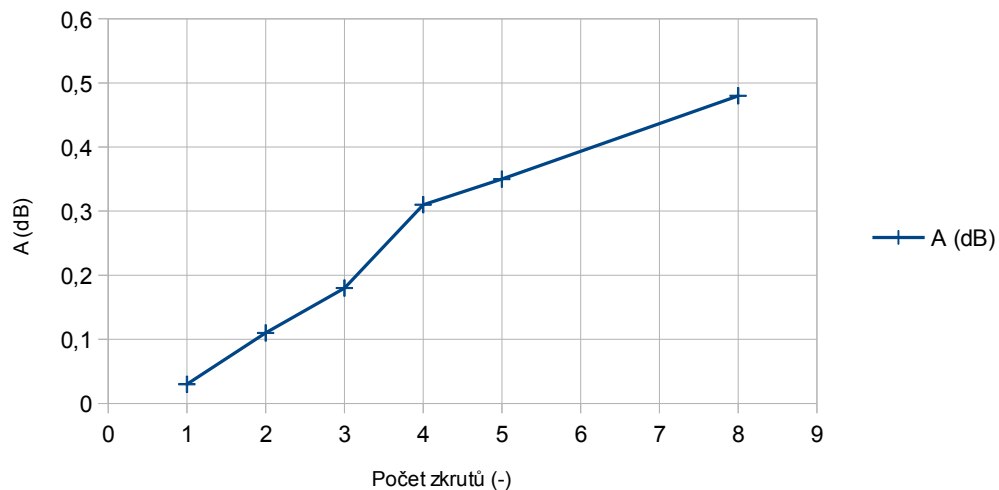
### Kroucení vlákna

Kroucení vlákna má, stejně jako ohyby přímí vliv na nárůst útlumu. Tento typ namáhání se může vyskytnout například pokud je vlákno napnuto mezi dvěma pevnými body, nebo pokud je spojeno s jiným typem vedení, které se může kroutit vlivem vnějších vlivů. V následující tabulce 4.6 jsou uvedeny hodnoty útlumu pro jednotlivý počet zkrutů POF vlákna. Jeden zkrut znamená zkroucení o  $360^\circ$ , další zkruty jsou celočíselným násobkem úhlu  $360^\circ$ .

Jak je vidět z tabulky a grafu 4.11, zkruty nemají takový vliv na útlum signálu, jako ohyby. Navíc, lze předpokládat, že k několikanásobnému zkroucení vlákna dojde jen ve velmi omezeném množství případů.

Tab. 4.6: Závislost útlumu signálu vlivem kroucení vlákna

Počet zkrutů	Útlum (dB)
1	0,03
2	0,11
3	0,18
4	0,31
5	0,35
8	0,48



Obr. 4.11: Graf závislosti útlumu na počtu zkrutů.

### 4.5.5 Mikroohyby vlákna

V praxi existují i tzv. mikroohyby, které znamenají vnější, rozprostřený tlak na ochranný plášť vlákna. Mikroohyby jsou velkým problémem u skleněných vláken, neboť způsobují znatelný nárůst útlumu a nelze je dostatečně odstranit.

Při této zkoušce se zabýváme vlivem mikroohybů na POF vlákno, především nás zajímají hodnoty útlumu a přenosová rychlost na POF vlákně. Použit byl přípravek pro vytváření mikroohybů pro skleněná vlákna. Vlákno bylo vloženo do přípravku a postupně byl navyšován počet otáček. Na detektoru byla pozorována úroveň přijímaného signálu a následně byla odečtena od referenčního.

Z pozorování bylo zjištěno, že mikroohyby nemají prakticky žádný vliv na nárůst útlumu, což si lze odůvodnit dostatečnou ochranou vrstvou kolem vlákna. Vlákno samotné, bez ochrany je mikroohyby ovlivňováno v řádu několika desetin dB útlumu.



Obr. 4.12: Přípravek pro vytváření mikroohybů a dvojice POF převodníků.

### 4.5.6 Zkouška přerušování komunikace

Pomocí volně položeného POF vlákna byly propojeny dva počítače přes POF převodníků. Naměřená rychlost pomocí programu *iperf* byla opakovaně 94,6 Mb/s. Jelikož měření bylo provedeno na aplikační vrstvě síťového modelu, nelze tedy očekávat plnou rychlost 100 Mb/s která je definována na linkové vrstvě.

Zkouška dále pokračovala tím, že bylo vlákno ohnuto přes hranu tvrdého předmětu. Nejprve do úhlu 90°, což způsobilo útlum 2,9 dB a 180° kdy byl útlum 9 dB.

Ohyb silou pod úhlem  $180^\circ$  způsobil, že se ochranný plášť poškodil a část světla viditelně vyzařovala ven z vlákna.

S tímto poškozeným vláknem byly opět spojeny dva POF převodníky a pomocí programu *iperf* byla změřena přenosová rychlost o hodnotě 94 Mb/s. Při opakování měření rychlosti, bylo zjištěno že POF převodník samovolně náhodně přejde na nižší rychlost 10 Mb/s. Tento jev lze přisuzovat tomu, že převodník má nastavenou hranici citlivosti přijímače a pokud hodnota přijímaného signálu klesne pod určitou hranici, pokusí se s protistranou dohodnout na nižší rychlosti. Tato funkce se nazývá Autonegotiation a je součástí standardu IEEE 802.3u (Fast Ethernet), který oba převodníky podporují. Při rozpojení UTP kabelů a opětovném spojení došlo opět ke spojení obou stran na hodnotě 100 Mb/s. Proto lze označit jev, kdy dojde k poklesu rychlosti jako náhodný.

Hodnota útlumu, kdy došlo k přepnutí na nižší rychlost přenosu byla stanovena následovně: POF převodník vyzařoval při úrovni výkonu  $-20,09$  dBm a změřená úroveň na poškozeném vlákně byla  $-28,57$  dBm. Hodnota útlumu, kdy dojde alespoň k částečnému ovlivnění přenosu je tedy 8,48 dB.

I přes snahu způsobit další, několikanásobné mechanické ohyby a velmi silné namáhání se nepodařilo docílit nárůstu útlumu na takovou hodnotu, kdy by byla komunikace úplně nemožná. V praxi je tedy přerušení komunikace po plastovém vlákně v rámci běžného mechanického namáhání téměř vyloučeno.



## 5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce si kladla za cíl seznámit s plastovými optickými vlákny.

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 a 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, vystačí si s levnějšími LED. Útlum je sice větší, než u skleněných vláken, ale přesto POF vlákna přejímá hlavní benefit: odolnost vůči elektromagnetickému rušení.

Plastová vlákna 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.

POF vlákna by mohla v horizontu několika let vstoupit do oblasti lokálních sítí, a připravit tak půdu pro moderní síťové služby, především IPTV, která je velmi citlivá na rušení, přeslechy a vyžaduje značnou šířku přenosového pásma.

V oblasti vývoje je potřeba udělat další krok. Především rozšířit a vylepšit stávající parametry tak, aby POF vlákna získala výhodu oproti stávající strukturované kabeláži na bázi mědi, která je stále velmi rozšířená. Do jisté míry je problémem malá podpora u společností, které se zabývají výrobou síťových prvků. Částečně za to zřejmě může i velmi malá snaha o širokou standardizaci postupů a řešení, což by do budoucna zajistilo vzájemnou kompatibilitu mezi výrobci.

Využití POF vláken v přístupových sítích FTTH nebo FTTB bude v tom ohledu, že se modernizuje část sítě od hraničního prvku v bytě ke koncovému zařízení uživatele. Nelze předpokládat, že by se plastová vlákna uchytila v distribuční části sítě, jelikož je zde mnoho limitujících faktorů. Na druhou stranu, POF vlákna by mohla vyplnit úzkou mezeru ve specifických požadavcích.

Ve spojení s postupným budování optických přístupových sítí je potřeba se dostatečně věnovat i lokálním sítím, kde by mohlo časem dojít k situaci, kdy měděná kabeláž nestačí a je potřeba ještě více kapacity. V tomto směru nelze spoléhat na bezdrátová řešení, která sice poskytují uživateli komfort, ale nikoli už dostatečně kvalitní přenosové parametry.

Zavedení POF vláken do moderní domácnosti bude spíše pomalé. Současnému masivnímu rozšíření řešení na bázi POF vláken brání především nerozvinutý trh s aktivními prvky a nezáměr o nové možnosti ze strany uživatelů. Všepřítomný trend navyšování přenosových kapacit je ale nezastavitelný a tato situace nahrává novým technologiím, jako jsou právě plastová optická vlákna.

## LITERATURA

- [1] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku..* Vyd. 1. Brno: Centa, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. VŠB – Technická universita Ostrava, 2006 [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: <http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [3] 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.
- [4] SIAN CHONG JEFFREY, Lee. *Discrete Multitone Modulation for Short-Range Optical Communications*. Eindhoven, 2009. ISBN 978-90-386-2115-9. Dostupné z: <http://alexandria.tue.nl/extra2/200613098.pdf>. PhD Thesis. Eindhoven University of Technology.
- [5] *What are POF?: A short description of properties, applications and handling*. In: [online]. [cit. 2012-10-29]. Dostupné z: [http://www.pofac.de/downloads/pofac/What\\_are\\_POF.pdf](http://www.pofac.de/downloads/pofac/What_are_POF.pdf)
- [6] PENG, Hsiao-Chun, Hai-Han LU, Heng-Sheng SU, Chin-Tai HSU. *Integration of FTTH and GI-POF in-house networks based on injection locking and direct-detection techniques*. Opt. Express 19, 6749-6755 (2011) [online]. 2011 [cit. 2012-11-05]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/oe/viewmedia.cfm?uri=oe-19-7-6749&seq=0>
- [7] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. *Současné a budoucí varianty pasivních optických přístupových sítí*. Elektorevue [online]. 2009, č. 36 [cit. 2012-11-06]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektorevue.cz/cz/download/soucasne-a-budouci-varianty-pasivnich-optickyh-pristupovych-siti>
- [8] KREJČÍ, Jaroslav a LAFATA Pavel. *Současné a budoucí možnosti řešení přístupové sítě pro IPTV*. Elektorevue [online]. 2010, č. 64 [cit. 2012-12-06]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektorevue.cz/cz/download/soucasne-a-budouci-moznosti-reseni-pristupove-site-pro-iptv/>
- [9] SCHLITTER, P. *Optické přístupové sítě*. Access Server [online]. 2004, č. 1 [cit. 2012-11-17]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072807>

- [10] VODRÁŽKA, J. *Základy FTTx*. Access Server [online]. 2006, č. 1 [cit. 2012-12-01]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=&cislocclanku=2006051702>
- [11] *Gigabit ethernet transmission experiments using GI-POF* [online]. Brussels, Belgium, 2001[cit. 2012-11-10]. 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>
- [12] *POF@10G Group Announces 10G Transmission Over Graded Index Plastic Optical Fibre* [online]. 2006 [cit. 10-11-2012]. Dostupné z: [http://www.chromisfiber.com/pdf/PRPOF\\_10G.pdf](http://www.chromisfiber.com/pdf/PRPOF_10G.pdf)
- [13] *About Optical Fibers*. Firecomms Ltd. [online]. 2012 [cit. 2012-11-13]. Dostupné z [http://www.firecomms.com/products-about\\_fibers.html](http://www.firecomms.com/products-about_fibers.html)
- [14] TRULOVE, James. *Sítě LAN: hardware, instalace a zapojení*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, 384 s. ISBN 978-80-247-2098-2.
- [15] Project Final Report. In: *POF-PLUS* [online]. 2011 [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: <http://130.192.85.10:8080/pofplus/documents/public-deliverables/POF-PLUS-Public-Final-Report.pdf>
- [16] OPTOKON A.S. *Data Network Equipment* [online]. 2012 [cit. 2012-12-04]. Dostupné z: <http://optokon.cz/data-network-equipment>
- [17] Demonstration of 1 Gbps over 50 m of low cost SI-POF with KDPOF technology. *KDPOF* [online]. 2010, č. 1 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [http://www.kdpof.com/wp-content/uploads/2012/09/kdpof\\_demo\\_1Gbps.pdf](http://www.kdpof.com/wp-content/uploads/2012/09/kdpof_demo_1Gbps.pdf)
- [18] OLT OVERTEK E8110T User's Manual. *OverTek* [online]. 2011, [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: [http://wiki.overttek.com.br/images/5/59/Manual\\_OLT\\_OverTek\\_E8110T.pdf](http://wiki.overttek.com.br/images/5/59/Manual_OLT_OverTek_E8110T.pdf)
- [19] ONU OVERTEK E8010U User's Manual. *OverTek* [online]. 2011, [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: [http://wiki.overttek.com.br/images/5/5a/Manual\\_ONU\\_OverTek\\_E8010U.pdf](http://wiki.overttek.com.br/images/5/5a/Manual_ONU_OverTek_E8010U.pdf)
- [20] ASM a.s. *FOP kabel, 0,98/1mm, duplex, 2x2,2mm, 0,2dB/m@650nm, PE, 1,25km* [online]. 2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.asm.cz/asmdata/fop-kabel-0981mm-duplex-2x22mm-02dbm650nm-pe-125km.html>

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AON Active Optical Network

ATM Asynchronous Transfer Mode

BER Bit Error Rate

c rychlost světla ve vakuu

DMT Discrete MultiTone

DSL Digital Sub-scriber Line

DSI-POF Double Step Index POF

DSI-MC-POF Multi Step Index Multi Core POF

EDC Electronic Dispersion Control

FTTX Fiber to the X

FTTEx Fibre to the Exchange

FTTC Fibre to the Curb/Cabinet

FTTB Fibre to the Building

FTTO Fibre to the Office

FTTH Fibre to the Home

FTTD Fibre to the Desk

GI-POF Graded Index POF

GPON Gigabit PON

GEPON Gigabit Ethernet PON

GOF Glass Optical Fiber

HD Hight Definition

IPTV IP Television

ISP Internet Service Provider

LAN Local Area Network

LED Light Emitting Diode

MC-POF Multi Core POF

MSI-POF Multi Step Index POF

$n$  index lomu světla

NA Numerická apertura

OLT Optical Link Termination

ONT Optical Network Termination

ONU Optical Network Unit

POF Polymer Optical Fiber

PON Pasive Optical Network

PMMA Polymethylmethakrylát

PTP Point-to-point

PTMP point-to-multipoint

QoS Quality of Service

SI-POF Step Index POF

TDM Time Division Multiplexing

USB Universal Serial Bus

UTP Unshielded Twisted Pair

$v$  rychlost světla v materiálu

VLAN Virtual Local Area Network

VDSL Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line

VoIP Voice Over IP

VCSEL Vertical Cavity Surface Emitting Laser

WDM Wavelength Division Multiplexing

WLAN Wireless Local Area Network

# SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah DVD

55

## **A OBSAH DVD**

Elektronická verze práce ve formátu PDF.