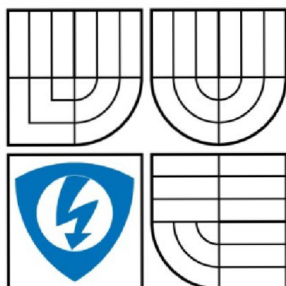


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# MĚŘÍCÍ METODY KLÍČOVÝCH PARAMETRŮ V OPTICKÝCH SÍTÍCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

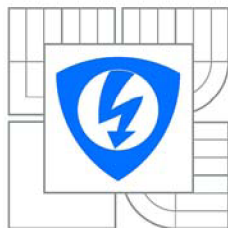
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. JIŘÍ BALON

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. VLADIMÍR TEJKAL

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. Jiří Balon **ID:** 78084  
**Ročník:** 2 **Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Měřicí metody klíčových parametrů v optických sítích**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem projektu je prostudovat metody měření v optických sítích. Zaměřte se na metody pro měření útlumu a disperzních vlivů. Uveďte současné trendy v měřících metodách pro přístupové sítě. Zhodnoťte možnosti dohledových systémů v páteřních sítích a jejich praktické využití.

Vytvořte metodickou příručku pro závěrečná měření vhodnou pro použití v praxi. Zaměřte se na měření v pasivních optických sítích s optickými odbočnicemi. Porovnejte vypracované metody měření s metodami používanými v současné praxi. Vybrané metody měření proveďte prakticky a zhodnoťte jejich výhody a nevýhody.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] GIRARD, A. FTTx PON Technology and Testing. EXFO Electro-Engineering Inc., Quebec City, Canada, 2005
- [2] KUCHARSKI M., DUBSKÝ P. Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras. Mikrokom, Praha 2001

**Termín zadání:** 29.1.2010

**Termín odevzdání:** 26.5.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Vladimír Tejkal

**prof. Ing. Kamil Vrba, 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**

Hlavním cílem diplomové práce bylo seznámit se s problematikou optických sítí a jejich měření při výstavbě. Celá práce je rozdělena do několika částí, kde první část se zabývá problematikou optických vláken, jsou zde uvedeny jejich druhy, vlastnosti a je také naznačen i základní princip šíření optického signálu těmito vlákny. Jsou zde popsány i architektury optických sítí FTTx (Fiber To The x). Druhá část této práce je zaměřena na metody pro měření klíčových parametrů optických sítí. Jsou zde uvedeny metody pro měření optického útlumu a disperzních vlivů. Poslední a závěrečná část je zaměřena na vytvoření metodické příručky pro měření těchto sítí při výstavbě a ověření měřících metod uvedených v teoretické části na skutečné síti. Měření se provádělo na optické síti Masarykovy univerzity v Brně.

## **Klíčová slova**

Optická vlákna, měřící metody, optický vložný útlum, optický útlum odrazu, chromatická disperze, polarizační vidová disperze, FTTx, pasivní optické sítě

## **Abstract**

The main goal of the master's thesis was to familiarize with optical networks dilemma and its measuring during fabrication. The whole thesis is divided into several parts where the first part deals with optic fiber dilemma. It describes its kinds, properties and also suggests a basic principle of optic signal dispersion using these fibers. It describes also optical network FTTx architecture (Fiber To The x). The second part of the thesis focuses on methods of measuring key parameters of optical networks. It brings out the methods of measuring optical loss and dispersive influences. The last and final part is focused on creating a methodical manual for measuring these networks during its fabrication and verifying measuring methods stated in the theoretical part inside a real network. Measuring was implemented on an optical network of Masaryk University in Brno.

## **Keywords**

Optical fibers, method of measurements, optical insertion loss, optical return loss, chromatic dispersion, polarisation mode dispersion, FTTx, passive optical network

## **Bibliografie**

BALON, J. Měřicí metody klíčových parametrů optických sítí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 82 s.  
Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Tejkal.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma měřící metody klíčových parametrů v optických sítích 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 práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne ..... .. podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimíru Tejkalovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 OPTICKÁ VLÁKNA.....</b>	<b>12</b>
1.1 DRUHY OPTICKÝCH VLÁKEN.....	14
1.1.1 Mnohovidová optická vlákna (MM – Multi Mode) .....	14
1.1.2 Jednovidová optická vlákna (SM – Single Mode) .....	15
1.1.3 Plastová optická vlákna (POF – Plastic Optical Fiber).....	15
1.1.4 Druhy optických vláken dle doporučení ITU-T .....	16
1.2 ZDROJE, PŘIJÍMAČE A ZESILOVAČE PRO OPTICKÁ VLÁKNA.....	17
1.2.1 Zdroje optického záření (Generátor).....	17
1.2.2 Přijímače optického záření (Detektor).....	18
1.2.3 Optické zesilovače .....	18
1.3 OPTICKÉ SPOJE.....	18
<b>2 VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN .....</b>	<b>21</b>
2.1 ÚTLUM OPTICKÝCH VLÁKEN .....	21
2.2 DISPERZE .....	24
2.2.1 Chromatická disperze (CD) .....	25
2.2.2 Vidová disperze.....	25
2.2.3 Polarizační vidová disperze (PMD) .....	26
<b>3. OPTICKÉ PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ FTTx.....</b>	<b>27</b>
3.1 DĚLENÍ OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍ.....	27
3.2 PŘÍSTUPOVÁ SEKCE OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍ .....	28
3.3 AKTIVNÍ PŘÍSTUPOVÁ SÍŤ (AON).....	29
3.4 PASIVNÍ PŘÍSTUPOVÁ SÍŤ (PON) .....	29
3.4.1 Standard APON/BPON .....	29
3.4.2 Standard GPON (Gigabit Passive Optical Network).....	30
3.4.3 Standard EPON (Ethernet Passive Optical Network).....	30
<b>4 METODY PRO MĚŘENÍ ÚTLUMU .....</b>	<b>31</b>
4.1 PŘÍMÁ (TRANSMISNÍ) METODA.....	31
4.1.1 Sestava pro měření přímou metodou .....	31
4.1.2 Varianty přímé metody.....	33
4.1.3 Vlivy ovlivňující naměřené výsledky .....	34
4.2 METODA PŘÍMÁ - PŘÍSTROJ OLTS (Optical Loss Test Set) .....	34
4.3 METODA OTDR (Optical Time Domain Reflectometer).....	35
4.3.1 Sestava pro měření metodou OTDR .....	35
4.3.2 Optický reflektometr .....	36



<b>5 METODY PRO MĚŘENÍ CHROMATICKÉ DISPERZE.....</b>	<b>39</b>
5.1 METODA FÁZOVÉHO POSUVU A DIFERENCIÁLNÍHO FÁZOVÉHO POSUVU .....	39
5.2 METODA INTERFEROMETRICKÁ .....	40
5.3 METODA ZPOŽDĚNÍ IMPULSŮ V ČASOVÉ OBLASTI .....	41
<b>6 METODY PRO MĚŘENÍ POLARIZAČNÍ VIDOVÁ DISPERZE (PMD) .....</b>	<b>42</b>
6.1 METODA TINTY (Traditional analysis INTY) .....	42
6.2 METODA GINTY (Genreal analysis INTY).....	44
6.3 METODA P-OTDR (Polarization Optical Time Domain Reflectometry).....	45
<b>7 MĚŘENÍ PASIVNÍCH OPTICKÝCH SÍTÍ .....</b>	<b>46</b>
7.1 TEST 1: OBOUSMĚRNÉ MĚŘENÍ VLOŽNÉHO ÚTLUMU OIL.....	46
7.2 TEST 2: OBOUSMĚRNÉ MĚŘENÍ ÚTLUMU ODRAZU ORL.....	47
7.3 TEST 3: OBOUSMĚRNÉ MĚŘENÍ END-TO-END CHARAKTERISTIKY.....	48
<b>8 DOHLEDOVÉ SYSTÉMY .....</b>	<b>49</b>
8.1 PRINCIP DOHLEDOVÝCH SYSTÉMU .....	49
8.2 METODY MONITOROVÁNÍ OPTICKÝCH TRAS .....	50
8.2.1 Přímá transmisní metoda .....	50
8.2.2 Reflektometrická metoda .....	51
8.2.3 ARFTS .....	51
<b>9 NÁVRH METODICKÉ PŘÍRUČKY PRO MĚŘENÍ OPTICKÝCH SÍTÍ .....</b>	<b>52</b>
9.1 MĚŘENÍ OPTICKÝCH SÍTÍ – soubor měření 1:.....	52
9.1.1 Kontrola čel konektorů .....	53
9.1.2 Útlum optické trasy .....	55
9.1.3 Útlum a lokalizace optických spojů a další parametry optických tras.....	56
9.1.4 Ostatní parametry, které je potřeba změřit po instalaci.....	56
9.2 MĚŘENÍ OPTICKÝCH SÍTÍ – soubor měření 2:.....	57
9.2.1 Měření útlumu odrazu.....	57
9.2.2 Měření chromatické disperze .....	58
9.2.3 Měření polarizační vidové disperze PMD .....	59
<b>10 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ MĚŘÍCÍCH METOD .....</b>	<b>61</b>
10.1 MĚŘENÍ OPTICKÉHO ÚTLUMU.....	61
10.1.1 Přímá metoda (OLTS).....	61
10.1.2 Metoda OTDR .....	63
10.2 MĚŘENÍ CHROMATICKÉ DISPERZE.....	65
10.2.1 Metoda fázového posuvu .....	65

10.2.2 Metoda reflektometrické .....	67
10.3 MĚŘENÍ POLARIZAČNÍ VIDOVÉ DISPERZE .....	69
10.3.1 Metoda GINTY .....	69
10.3.2 Metoda P-OTDR .....	71
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>72</b>
<b>SEZNAM LITERATURY.....</b>	<b>74</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>77</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>80</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>82</b>

## ÚVOD

Problematikou optických sítí se vědci zabývají už řadu let. Prvním, který se pokusil o přenos dat pomocí optických vláken, byl Heinrich Lamm v roce 1930. Od té doby došlo k velkému pokroku až k dnešním optickým vláknům a kabelům sloužícím pro přenos informací. Cílem diplomové práce je vytvořit ucelený přehled problematiky měření optických vláken a navrhnout metodickou příručku pro měření klíčových parametrů v praxi. Celá práce je rozdělena do několika hlavních částí.

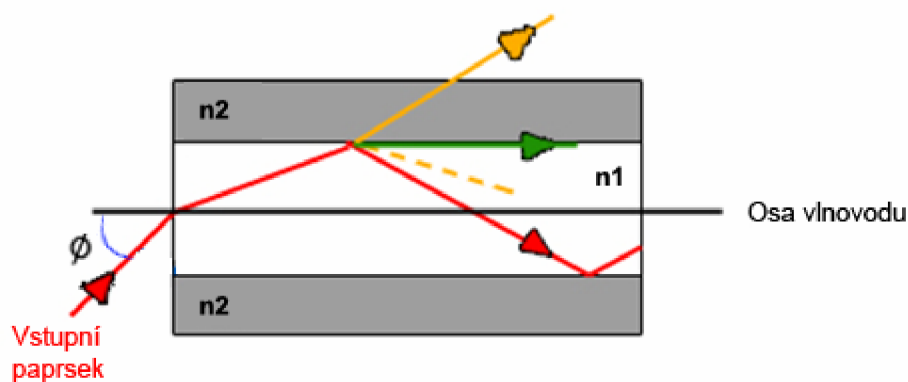
První část se zabývá samotnými optickými vlákny, jejich rozdělením a způsoby jejich spojování jako jsou konektory a sváry. Budou zde popsány používané optické zdroje, optické detektory a zařízení sloužící k zesílení přenášeného optického výkonu (optické zesilovače). Při vytváření optických tras neboli sítí se vyskytuje řada nežádoucích vlastností optických vláken jako optický útlum a disperzní vlivy, které nejvíce ovlivňují přenášený signál a tím i kvalitu přenášené informace.

V další části diplomové práce se budu zabývat tématem optických přístupových sítí FTTx. Optické přístupové sítě se začaly rychle rozvíjet a to z důvodu jejich schopnosti přenášet data mnohonásobně vyšší přenosovou rychlostí a odolnosti vůči elektromagnetickému rušení či odposlechům oproti klasickým metalickým sítím. Cena optických komponentů i samotných kabelů už není tak vysoká, což vede ke stále výraznějšímu používání v dnešní době. Budou zde vysvětleny základní rozdíly mezi aktivními a pasivními sítěmi, a uvedu zde i základní modely sítě FTTx, které se liší podle místa kam je optické vlákno přivedeno.

Poslední a pro tuto práci nejdůležitější částí je samotné měření optických sítí. Budu se zde zabývat metodami pro měření optického útlumu i metodami pro měření disperzních vlivů optických vláken. Uvedu zde metody, které slouží pro měření pasivních optických sítí PON. Součástí kapitoly zaměřené na měřicí metody bude i vytvoření metodické příručky pro měření klíčových parametrů v praxi. Cílem této příručky bude vytvořit ucelený přehled o měřících postupech při měření optického útlumu, chromatické a polarizační vidové disperze a následně tyto postupy ověřit v praxi. Praktické měření se bude provádět na Brněnské akademické optické síti a budu porovnávat jednotlivé vlastnosti daných měřících metod.

# 1 OPTICKÁ VLÁKNA

Jedná se o tenké dielektrické vlákno, vyrobeno z čistého křemičitého skla, které je dotováno příměsemi pro změnu indexu lomu. Používají se i vlákna vyrobená z plastu. Optické vlákno přenáší elektromagnetické vlny (především světlo nebo infračervené záření) ve směru své podélné osy. Princip šíření světla optickým vláknem je založen na principu Snellova zákona o odrazu a lomu (základem je geometrická optika). Na obrázku (Obr. 1) jsou popsány případy odrazu světelného paprsku ve vlákně. V optických vláknech je přenášeno světlo o vlnové délce v rozmezí 700 - 1700 nm. Dle určité oblasti vlnových délek mluvíme o přenosu světelného signálu v pásmech nazývaných jako telekomunikační okna.



Obr. 1: Odrazy světelného paprsku ve vlákně

Na obrázku jsou uvedeny příklady odrazu světelného paprsku ve vlákně. Červený paprsek představuje totální vnitřní odraz  $n_2 > n_1$ , žlutý pak částečný odraz do jádra a z jádra, nakonec zelený paprsek vyjadřuje odraz od prostředí v případě, že do vlákna vchází pod tzv. kritickým úhlem lomu.

## Totální odraz

Je definován tak, že paprsek, který vstupuje do vlnovodu, dopadá na rozhraní dvou různých prostředí s různými vlastnostmi (na rozhraní jádra a pláště) pod určitým mezním úhlem ( $\phi$ ). Pokud paprsek dopadá pod tímto úhlem, pak dochází k tomu, že se všechno světlo odrazí zpět do vlnovodu a putuje tak až k přijímači. Pokud by tento paprsek překročil definovaný mezní úhel (tzn. bude menší), došlo by k tomu, že by se část paprsku do vlákna nenavázala (ztráta přenášených informací). [2]

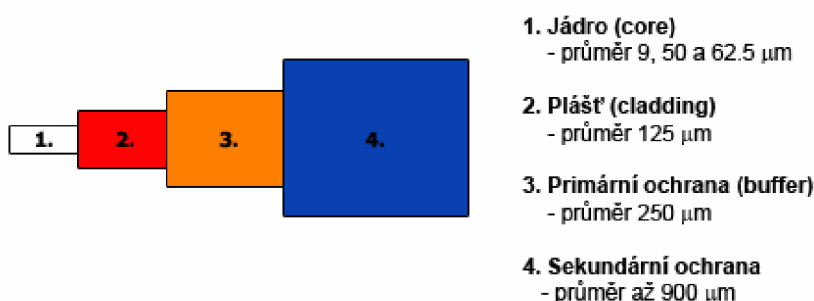
### Index lomu (n)

Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která charakterizuje dané optické prostředí zkoumaného optického vlákna a v něm šíření elektromagnetických vln (světla). Je definován jako poměr rychlosti světla ve vakuu ku rychlosti světla v daném prostředí (1.1). Index lomu není pro všechny vlnové délky stejný, ale liší se v závislosti na frekvenci. Index lomu pro vakuum je  $n=1$  a pro všechny ostatní prostředí musí tedy být  $n>1$ . Rychlost světla ve vláknech je také dána indexem lomu, což znamená, že čím je hodnota indexu lomu větší, tím se světlo pohybuje pomaleji. [2]

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

V telekomunikačních technologiích jsou optická vlákna více využívána než metalické vedení, protože jsou schopna přenášet data na dlouhé vzdálenosti při mnohem vyšších přenosových rychlostech a s mnohem menším útlumem. Dalším faktorem, který přispívá k častějšímu využívání optických kabelů místo metalických kabelů je schopnost přenášet data s menší ztrátou a jsou imunní proti elektromagnetickému rušení a odposlechům.

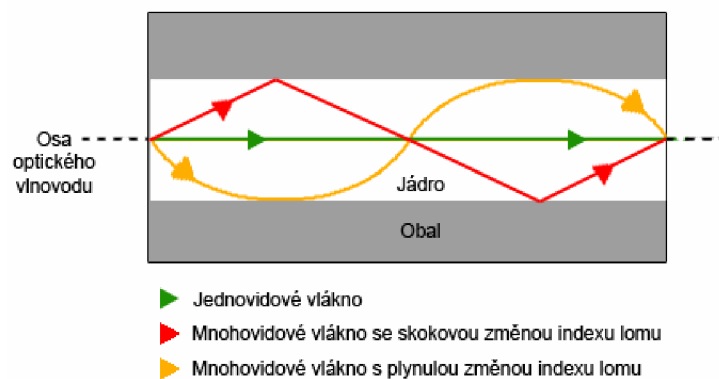
Optické vlákno se skládá ze tří základních částí a to z jádra (přenos elektromagnetických vln), pláště (vytváří rozhraní jádro plášť – odraz světla) a také primární ochrany (její funkce je zabraňovat mechanickému poškození vlákna). Pro zpevnění vlákna se ještě používá ochrana sekundární, která je buď těsná (PVC) nebo volná (gel). Struktura optických vláken je vyobrazena na obrázku (Obr. 2). [1]



Obr. 2: Struktura optického vlákna

## 1.1 DRUHY OPTICKÝCH VLÁKEN

V telekomunikační technice se pro přenos dat používají optická vlákna, která se dále slučují do svazků neboli optických kabelů. Optická vlákna rozdělujeme dle několika kritérií podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny - skleněná, plastová, dále podle počtu přenášených vidů v jednom vlákne - jednovidová, mnohovidová. Mnohovidová vlákna pak ještě dále rozdělujeme dle indexu lomu se skokovou změnou indexu lomu a plynulou změnou indexu lomu (Obr. 3). Index lomu u jednovidových vláken může mít třeba jehlanový průběh. [1]



Obr. 3: Šíření optického paprsku v různých typech optických vláken

### 1.1.1 Mnohovidová optická vlákna (MM – Multi Mode)

Mnohovidová vlákna rozdělujeme do dvou skupin podle změny indexu lomu, a to na vlákna se skokovou změnou indexu lomu (Step Index) a vlákna s plynulou změnou indexu lomu (Gradient).

Mnohovidová optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu mají na rozdíl od vláken jednovidových několikanásobně větší průměr jádra (EU 50  $\mu\text{m}$  a USA 62,5  $\mu\text{m}$ ) a díky tomu jsou schopny přenášet řádově stovky až tisíce vidů současně. Mnohovidová vlákna se převážně využívají v optických trasách na krátké vzdálenosti. Důvodem je to, že dosahují horších parametrů, a to konkrétně větší útlum a nižší přenosová frekvence. Princip přenosu v tomto typu optického vlákna spočívá v tom, že do vlákna vstupuje současně několik stovek až tisíc vidů. Vidy, vstupující do optického vlnovodu, musí splňovat podmínku totálního odrazu. Pokud tuto podmínku nesplňují, vidy se neodrazí zpět do vlnovodu, jak mají, a jsou staženy pláštěm, kde zanikají. Vidová disperze tohoto

typu vlákna způsobuje omezení dané šířky pásma na 50 MHz/km. Útlum vlákna je pro vlnovou délku 850 nm v rozmezí 2,6 – 50 dB/km.

Mnohovidová optická vlákna s plynulou změnou indexu lomu se oproti vláknům se skokovou změnou liší průběhem šíření vidů ve vlákně. Šíření světla ve vlákně probíhá tak, že ve středu jádra je index lomu větší než na okraji. Paprsek se ve vlákně šíří na principu sinusoidy. Na jednotlivých vrstvách dochází k drobným lomům, což na pohled vypadá jako by se jednalo o plynulý průběh. Vidy šířící se blíže ke středu jádra se pohybují pomaleji než vidy šířící se nejbližší k obalu jádra. Díky této vlastnosti je zajištěno, že se vidy vždy sejdou v jednom bodě, odkud pokračují dále. Gradientní vlákna dosahují nižšího útlumu než vlákna se skokovou změnou indexu lomu a jsou proto používána na středně dlouhé optické trasy. Útlum vlákna je pro vlnovou délku 850 nm 2–10 dB/km, pro 1300 nm je 0,5 dB/km a pro 1550 je útlum 0,25 dB/km. [1]

### **1.1.2 Jednovidová optická vlákna (SM – Single Mode)**

Jedná se o optická vlákna, která mají velmi malý průměr jádra 9  $\mu\text{m}$ . Jejich charakteristickou vlastností je, že přenáší pouze jeden základní vid (LP<sub>01</sub>) optickým vlnovodem. Protože je jádro příliš malé a společně s pláštěm dosahuje průměru 125  $\mu\text{m}$ , je velmi obtížné navázat světlo do vlákna. Pro tento účel se používají jako budící zařízení lasery. Jednovidová vlákna odstraňují vidovou disperzi, zato se u nich projevuje disperze chromatická. U těchto vláken je velkou výhodou, že dosahují nižšího útlumu a větší přenosové frekvence než vlákna mnohovidová, a proto se převážně používají pro optické trasy na dlouhé vzdálenosti. Další vlastností je, že změnou profilu indexu lomu jsme schopni měnit vlastnosti celého vlákna. Útlum vlákna je na vlnové délce 1300 nm přibližně 0,35 dB/km a pro 1550 nm přibližně 0,25 dB/km [1].

### **1.1.3 Plastová optická vlákna (POF – Plastic Optical Fiber)**

V telekomunikačních technologiích se zřídka používají vlákna vyrobená z plastu (POF), využití našly především v automobilovém průmyslu, kde se převážně používají například pro osvětlení kontrolek. Tato vlákna mají mnohem větší útlum a větší průměr jádra (1 cm) než klasická skleněná vlákna. Útlum těchto vláken dříve dosahoval hodnot okolo 100 dB/km, v dnešní době se podařilo tento útlum snížit na hodnotu řádově

10 dB/km což ale stále pro přenos dat nevyhovuje. Velkou výhodou oproti vláknům skleněným je v tom, že pokud má vlákno větší průměr jádra, tak se snadněji konektuje a svařuje, dále výrobní náklady jsou mnohem nižší a i jejich výroba je podstatně jednodušší. [1]

#### **1.1.4 Druhy optických vláken dle doporučení ITU-T**

Jednotlivé standardy pro optická vlákna jsou definovány dle doporučení ITU-T (International Telecommunication Unit). Každý standard definuje určité vlastnosti, kterými se bude dané optické vlákno projevovat a zároveň lišit od ostatních. Rozdíly mezi těmito standardy se dají shrnout do třech skupin a to na geometrické parametry (tvar indexu lomu, průměr, délka), přenosové parametry (počet přenášených vidů, útlum, ztráty) a mechanické parametry (ohyby a makroohyby vlákna). Především rozdíl v profilu indexu lomu určuje, na jaké vlnové délce bude chromatická disperze daného vlákna nulová.

##### Doporučení G.652

Jedná se o konvenční jednovidové vlákno USF (Unshifted Fiber) se skokovým indexem lomu. Je schopno pracovat na vlnové délce 1310 nm, kde jeho chromatická disperze je nulová a jeho maximální útlum dosahuje hodnoty 0,5 dB/km. U systémů DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) se tato optická vlákna využívají pro vlnovou délku 1550 nm, kde jejich maximální útlum dosahuje hodnoty 0,4 dB/km.

##### Doporučení G.655

Jedná se o optické jednovidové vlákno s nenulovou posunutou chromatickou disperzí NZ-DSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber). Je převážně určeno pro systémy DWDM pracující na vlnové délce 1550 nm a dosahuje maximálního útlumu o hodnotě 0,35 dB/Km.

##### Doporučení G.657

Tento typ jednovidového optického vlákna je novým standardem definovaným dle ITU-T. Vylepšením oproti předcházejícím typům je to, že není náchylné na ohyby a uplatnění má na poslední míli, kde se může bez problémů instalovat podél rohů.



Hodnota vložného útlumu je  $< 0,4$  dB/km. Další výhodou je, že vlákno G.657 (A, B) je plně kompatibilní s vlákny typu G.652.D a při jejich spojování nedochází ke zvyšování útlumu.

## 1.2 ZDROJE, PŘIJÍMAČE A ZESILOVAČE PRO OPTICKÁ VLÁKNA

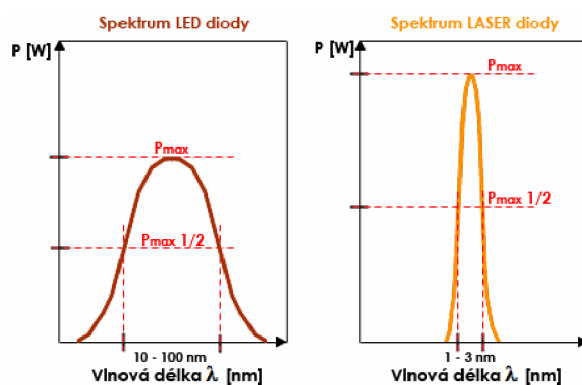
### 1.2.1 Zdroje optického záření (Generátor)

V optických systémech se jako zdroje záření používají optické generátory, jejichž princip spočívá v převodu elektrického signálu na signál optický. Díky svým miniaturním rozměrům, které jsou srovnatelné s průměrem jádra vlákna, je velmi snadné navázat optický signál do vlákna. Tyto optické vysílače jsou schopny vysílat světelný signál na vlnové délce v rozmezí 700 – 1700 nm. Jako nejpoužívanější zdroje záření se používají dva druhy zdrojů záření:

- LED (Light Emitting Diode)
- LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Jako LED generátor záření se v praxi běžně používají polovodičové diody LED nebo také superluminiscenční SLED diody. Jsou specifické svým nekoherentním monochromatickým zářením se šířkou spektra od 10 nm do 100 nm a jejich účinnost navázání světla do vlákna je kolem 10 %. Výstupní výkon těchto zdrojů je poměrně malý a dosahuje hodnot řádově desítky až stovky mikrowattů.

Laser diody (LD) jsou podstatně dražší, ale díky svým parametrům jsou mnohem výhodnější pro použití než diody LED. Tyto zdroje mají monochromatické koherentní záření se šířkou spektra 1 – 3 nm a účinnost je až 90 %. Mají velmi velký výstupní výkon, který dosahuje jednotek až desítek miliwattů. [4]



Obr. 4: Spektrální šířka pásma pro LED a LASER diody

### **1.2.2 Přijímače optického záření (Detektor)**

Jako přijímač optického signálu se v optických systémech používají polovodičové detektory optického záření. Jejich princip je velmi podobný optickým generátorům a spočívá v převodu optického signálu zpět na signál elektrický. Rozměry optických detektorů by měly být co nejmenší, aby byly schopny se jednoduše navázat na optické vlákno. Jejich další důležitou vlastností je stabilita a kompatibilita s generátorem záření. V praxi se nejčastěji používají tyto detektory optického záření. [4]

- PIN dioda
- APD Lavinová fotodioda

### **1.2.3 Optické zesilovače**

Funkce optického zesilovače spočívá v zesílení optického výkonu, což nám umožňuje přenášet světelný signál na mnohem větší vzdálenosti. Pokud bychom optický zesilovač nepoužili, mohlo by se stát, že vysílaný signál by klesl na takovou úroveň, kterou by nebyl detektor schopen dekódovat. Nejčastěji se používají optické zesilovače pracující na bázi EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Optické zesilovače jsou v optické síti instalovány ve třech variantách (předzesilovač, průběžný a koncový). [4]

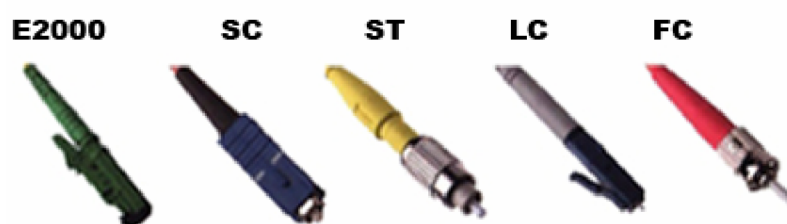
## **1.3 OPTICKÉ SPOJE**

Optická vlákna jsou vyráběna v určitých délkách, proto se musí spojovat. Abychom byli schopni spojovat daná optická vlákna na velké vzdálenosti, musíme využít spojovacího prvku. V optické technice se využívají dva druhy spojování a to rozebíratelné (konektory) nebo nerozebíratelné (sváry). U obou typů spojování však musíme dbát na preciznost provedení daného spoje, protože sebemenší nečistota nebo poškození konektoru vede ke zvýšení útlumu a snížení útlumu odrazu a to pak může vést k velkým ztrátám na vedení.

Svařování optických vláken se používá v případech, kdy už dále nechceme vlákno rozebírat. Takto spojená optická vlákna dosahují mnohem menších útlumů než vlákna spojená optickými konektory a měla by dosahovat útlumu maximálně 0,1 dB/km. Svařování dvou optických vláken se provádí pomocí speciální svářečky elektrickým

obloukem za vysoké teploty a po co nejkratší čas. Po svaření se daný spoj musí zpevnit, protože svár je velmi náchylný na poškození. To se provede navléknutím plastové trubičky na svár a přes tuto trubičku se poté ještě navlékne gumová bužírka, která slouží pouze k zabránění vniku nečistot.

Další možností spojování dvou optických vláken je použití optických konektorů. Ty se používají v případě kdy je určitá pravděpodobnost nebo dokonce nutnost daný spoj později rozpojit. Optické konektory se používají jako koncové prvky optických vláken pro připojení k optickým zařízením (vysílač, detektor, mediakonvertor). Optické konektory se skládají z několika částí a to ferule (plast, kov nebo sklo), samotného těla konektoru (kov, plast), dále pak ze zámku (bajonet nebo matice) a nakonec z kabelové koncovky. Útlum konektorů je oproti svárům vyšší a dosahuje hodnot přibližně v rozmezí 0,2 – 0,5 dB/Km. Optické konektory se vyrábějí ve dvou variantách. Jedná se o konektory rozebíratelné nebo nerozebíratelné. Nerozebíratelné konektory se vyrábějí tak, že optické vlákno se za pomoci speciálního lepidla přichytí do ferule konektoru, konec vlákna je poté zalomen a přebroušen. Existuje několik typů přebroušení konců optických vláken, přebroušení typu FC (Flat Contact), PC (Point Contact) a APC (Angle Point Contact), kdy je konec vlákna broušen pod úhlem 8° a to má za následek zvýšení útlumu odrazu. Mezi nejpoužívanější konektory patří konektory ST, SC, LC, FC a E2000, které jsou uvedeny na obrázku níže (Obr. 5).



Obr. 5: Typy konektorů

Konektor typu E2000 je uzpůsoben na jednovidová vlákna a je převážně využíván v dálkových sítích (WAN). Jeho velkou předností oproti ostatním konektorům je integrovaná protiprachová krytka, která zabraňuje jeho poškození a znečištění. Toto provedení má úhlové zabroušení ferule (APC), která je vyrobena ze zirkoniové keramiky. Útlum toho optického konektoru je  $OIL < 0,35$  dB, ale typicky se udává hodnota  $OIL < 0,2$  dB. Útlum odrazu dosahuje hodnoty  $ORL > 60$  dB.

Konektor typu SC je využíván jako náhrada za konektor typu ST. Jedná se o hranatý konektor s plastovým pojistným mechanismem. Je vyráběn ve dvou provedeních - simplex či duplex, ale častější je duplexní provedení. Velké využití našel při výstavbě sítí LAN a při použití úhlového zabroušení APC se dá použít i pro sítě WAN a dálkové přenosy.

Konektor typu ST, který je zakončen bajonetovým uchycením se nejvíce využívá v průmyslových systémech. Hlavní příčinou proč je tento konektor tak žádaný je jeho nízká cena ve srovnání s ostatními a také jednoduchá instalace. Proto se tento konektor také často používá při výstavbě sítí LAN.

Konektor typu LC spadá do skupiny kvalitních miniaturních konektorů vyráběného firmou Lucent Technologies. Ferule konektoru je vyrobena ze zirkoniové keramiky a je používán ve vysokorychlostních systémech a sítích WAN. Útlum konektoru pro mnohovlákna dosahuje hodnoty OIL < 0,35 dB ale typicky je udávána hodnota OIL < 0,15 dB a útlum odrazu dosahuje hodnoty ORL > 25 dB. U vláken jednovlákna dosahuje hodnot útlumu OIL < 0,35 dB, ale typicky hodnoty OIL < 0,2 dB. Hodnota útlumu odrazu pak je ORL > 45 dB a v provedení se zabroušením APC je ORL > 60 dB.

Konektor typu FC je v šroubovacím provedení a je využíván pro WAN sítě. Své uplatnění našel v měřících přístrojích, kde je často používán. [4]

## 2 VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN

U optických sítí se nejčastěji pozorují a měří parametry jako je optický útlum, útlum odrazu a disperze ve vláknech a jejich závislosti na vlnové délce.

### 2.1 ÚTLUM OPTICKÝCH VLÁKEN

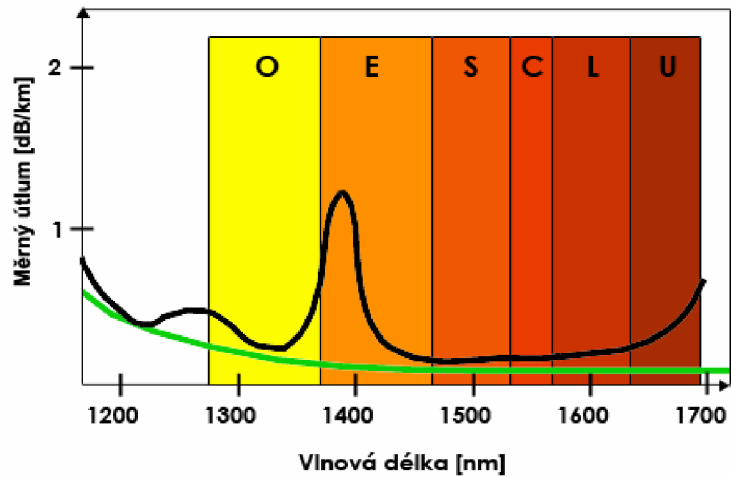
Při přenosu dat na velké vzdálenosti dochází stejně jako u metalických kabelů, tak i u optických vláken k určitým ztrátám neboli útlumům. Útlum je udáván v jednotce dB/km. Tímto problémem se vědci zabývali dlouhá léta a v dnešní době jsou již optická vlákna na takové úrovni, že dosahují minimálních hodnot útlumu oproti dřívějším letům. Velikost útlumu optického vlákna ovlivňuje celá řada nežádoucích vlivů, jako například:

- Absorpce daného prostředí (vlastní a nevlastní)
- Rozptyl způsobený nehomogenitami vlákna (lineární a nelineární)
- Ztráty v ohybech (mikroohyby a makroohyby)
- Ztráty v optických spojích (konektory a sváry)

#### ***Vlastní a nevlastní absorpce***

U nevlastní absorpce je hodnota útlumu závislá na množství nečistot v optickém vláknech. Čím je tedy vlákno čistější, tím nižších útlumů dosahuje. Nejčastější příčina zvýšení útlumu optického vlákna je způsobena ionty kovů (Fe, Cu, Cr) a ionty vody ( $\text{OH}^-$ ).

Vlastní absorpce je dána materiálem samotného vlákna a je také závislá na vlnové délce přenášeného záření. V telekomunikační technice se využívá několika tzv. přenosových oken. Útlumová charakteristika křemíkových optických vláken vykazuje několik míst se zvýšeným útlumem a mezi nimi jsou i úseky s nižším útlumem, kterým se říká „okna“. Podle doporučení ITU-T jsou pro jednovláknová vlákna definována okna vyobrazená na obrázku (obr. 6). [2]



Obr. 6: Rozdělení přenosových pásem pro jednovidová vlákna

Černá křivka ukazuje standardní vlákno G.652, zato zelená křivka zobrazuje vlákno AllWave, u kterého je výrazně potlačen útlum v oblasti OH peak 1383 nm.

### ***Lineární a nelineární rozptyl***

Lineární rozptyl optických vláken je většinou způsobený různými nečistotami nebo nehomogenitami. Nejčastější druh rozptylu, se kterým se setkáváme, je Rayleighův rozptyl, který vzniká, když jsou nečistoty a nehomogenity daného vlákna rozměrově menší oproti vlnové délce.

Nelineární rozptyl v optických vláknech vzniká při změně vlnové délky. Rozlišujeme tři druhy nelineárních rozptylů - Ramanův, Brillouinův a stimulovaný rozptyl. [2]

### ***Ztráty v ohybech***

Při ohýbání optického vlákna dochází k vyzařování části energie světelného paprsku ven z jádra a to znamená, že čím více je v dané trase ohybů, tím dosahuje optické vlákno větších ztrát (většího útlumu). Ohyby vláken rozdělujeme na dva druhy, a to makroohyby a mikroohyby.

Mikroohyby vznikají v místech, kde se nacházejí drobné nedokonalosti na povrchu optických vláken, např. už při samotné výrobě. Tyto ztráty se nedají nijak měřit, a proto se jejich hodnota určuje experimentálně (pomocí statických metod). Výskyt mikroohybů

je náhodný a většinou je po celé délce optického vlákna, což způsobuje podstatné zvýšení útlumu vlákna. Další faktor, který ovlivňuje tento parametr, je vlnová délka. Platí proto, že čím větší je vlnová délka, tím větších ztrát dosahujeme. Jako mikroohyb bude vyhodnocená nehomogenita, která vznikne tehdy, jestliže je rozdíl mezi útlumem na vlnové délce 1310 nm a 1550 nm větší než 0,03 dB.

Makroohyby vznikají v případě, že je vlákno příliš ohnuto, tzn. že poloměr ohybu dosahuje takové hodnoty, že už vid ve vlákně není schopen odrazu zpět do vlnovodu a část energie tohoto vidu se tedy vyzáří ven z vlákna. Makroohyby větší než mm nebo cm jsou většinou způsobovány při samotné práci s vlákny (vytváření vláknových rezerv o optických rozvaděčích). Tyto ohyby by v praxi neměly dosahovat hodnot menších jak 60 mm. Proto jsou definovány tzv. kritické hodnoty poloměru pro jednovidová i mnohovidová vlákna. [2], [6]

*Pro jednovidová vlákna:*

$$R = \frac{20\lambda}{(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{3}{2}}} \left( 2,748 - 0,996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right). \quad (2.1)$$

*Pro mnohovidová vlákna:*

$$R = \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (2.2)$$

### **Ztráty v konektorech a svárech**

Ztráty ve spojích optického vlákna jsou nejčastěji vytvořeny (způsobeny) nepřesným vytvořením daného spojovacího prvku. Už samotný fakt, že optické spojky jako konektory a sváry jsou pasivními prvky optických systémů (pouze zeslabující signál), způsobuje zvýšení ztrát neboli útlumu v optickém vlákně. Pokud však ještě při samotné montáži nebo výrobě dojde ke špatnému svaření nebo nakonektorování vlákna, může se stát, že hodnoty útlumu přesáhnou limitní parametry. Další vliv na zvýšení útlumu má množství těchto optických spojů v optické trase (čím více spojů, tím větší útlum).

### Numerická Apertura (NA)

Jedná se o další důležitý parametr ovlivňující šíření světla ve vláknech. Tento parametr dosahuje u vláken mnohobodových i jednovíkových hodnoty kolem 0,2 a udává kolik je vlákno schopno navázat optického výkonu do jádra. Jedná se o bezrozměrnou jednotku. Čím je numerická apertura větší, tím více světelného výkonu naváže do vlákna. Teoretická hodnota numerické apertury je  $NA = 1$ , což odpovídá  $90^\circ$ . Této hodnoty však nejsme schopni v praxi dosáhnout. Numerická apertura a ztráty s ní spojené vznikají při navazování světla do vlákna. [2]

$$NA = n_0 \cdot \sin \Phi_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} . \quad (2.3)$$

## **2.2 DISPERZE**

Jeden z velmi důležitých vlivů, který nám zapříčiňuje změnu nebo zkreslení signálu, přenášeného pomocí optického vlákna, je disperze optických vláken. Disperze udává, jaké bude mít vlákno vlastnosti (šířka přenášeného pásma, přenosovou rychlost). U digitálních systémů dochází především ke zvětšení šířky pulsu při průchodu vláknem a u analogových systémů je to především zmenšení frekvenční šířky přenášeného modulačního signálu na optické nosné.

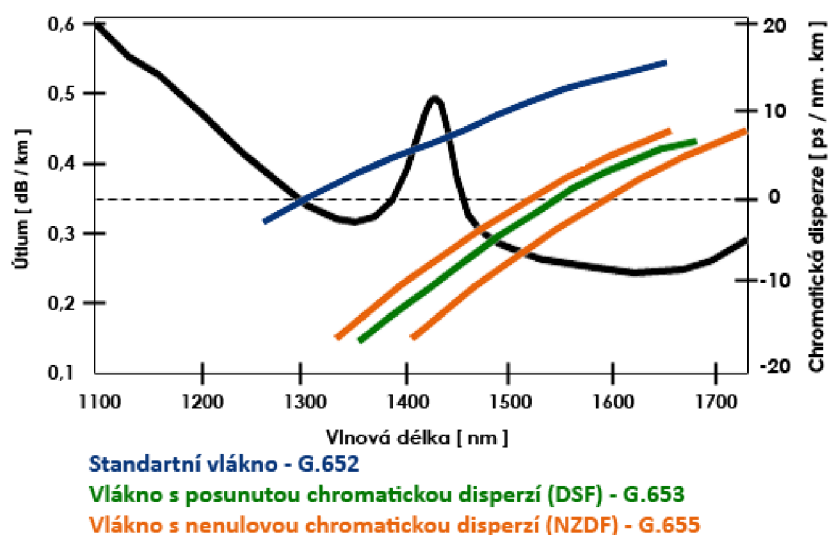
Disperze optických vláken je udávána jako rozdíl šířky pásma přenášeného pulsu na začátku a na konci trasy, měřená v polovině výšky daných pulsů. Ovlivnit velikost chromatické disperze lze provést zúžením kmitočtového spektra. Nejčastěji rozlišujeme tyto druhy disperzí: [2]

- Chromatická disperze CD (materiálová, vlnovodná, profilová)
- Vidová disperze
- Polarizační vidová disperze PMD



### 2.2.1 Chromatická disperze (CD)

Tento typ disperze se převážně udává pro vlákna jednovidová (ovlivňuje celkovou disperzi vlákna), protože u vláken mnohobodových dosahuje příliš malých hodnot a proto ji zanedbáváme a spíše se soustředíme na disperzi vidovou. U jednovidových vláken je chromatická disperze tvořena sloučením materiálové, vlnovodné a profilové disperze. Materiálová disperze vzniká při změně indexu lomu vlákna v závislosti na dané vlnové délce, která má pak za následek změnu skupinové a fázové rychlosti šíření jednotlivých vidů ve vlákně. Další částí při vzniku chromatické disperze je disperze vlnovodná. Nejčastější příčinou jejího vzniku je změna tvaru vidu s vlnovou délkou. Poslední je disperze profilová, která ovšem dosahuje tak malých hodnot, že se v praxi zanedbává. Vzniká při nestejném indexu lomu jádra a pláště. [1], [2]



Obr. 7: Chromatická disperze vláken G.652, G.653, G.655

### 2.2.2 Vidová disperze

Jeden z mnoha dalších faktorů, které mají nežádoucí vliv na přenos signálu optickým vláknem, je vidová disperze, která vzniká při rozdílné rychlosti jednotlivých přenášených vidů ve vlákně. Princip spočívá v rozložení vstupního signálu do všech vidů ve vlákně. Tím, že každý vid se v daném vlákně šíří jinou rychlostí dojde na výstupu k tomu, že jsou pomocí detektoru detekovány v pořadí, v jakém přišly (zpožděny v čase). Po jejich následném sečtení dojde k tomu, že výsledný signál bude oproti vstupnímu signálu rozšířený.

Její účinky se dají ovlivnit buďto snížením počtu vidů ve vlákne až na jeden vid (vhodná konstrukce vlnovodů), a nebo vyrovnáním skupinových rychlostí jednotlivých vidů šířících se ve vlákne (vhodné uspořádání struktury vlnovodu – gradientní vlákna). Vidová disperze se vyskytuje jen u vláken mnohovidových (MM), u jednovidových vláken se tato disperze nevyskytuje. [3]

### **2.2.3 Polarizační vidová disperze (PMD)**

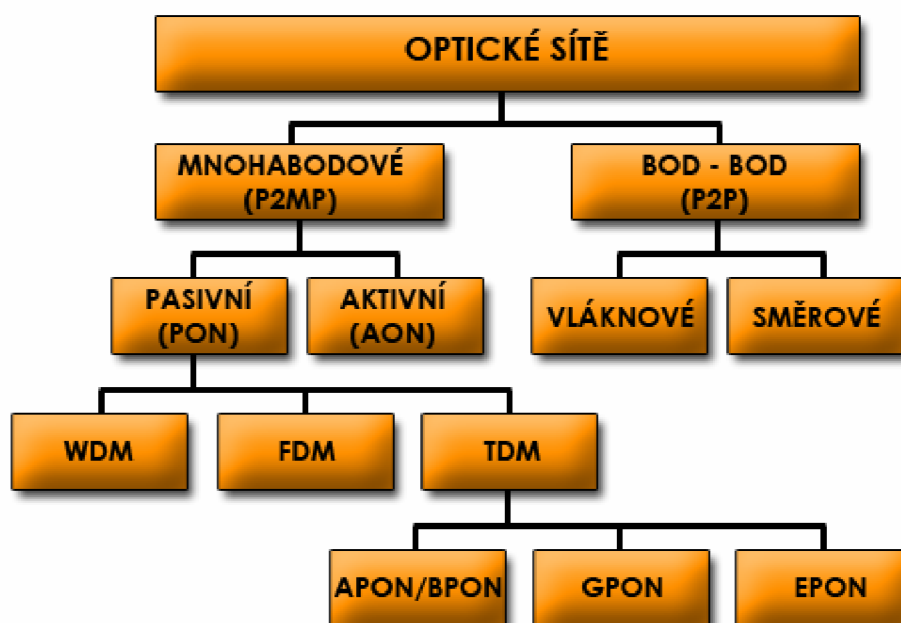
Je to další parametr, který je závislý na rychlosti šíření vidů ve vlákne. Dříve ji nebylo nutné měřit, protože se nepoužívaly tak vysoké přenosové rychlosti, aby se uplatnily (dosahovala zanedbatelných hodnot). S nárůstem přenosových rychlostí u jednovidových vláken však začala mít nežádoucí vliv na přenášený signál. Šíření vidu probíhá ve dvou navzájem kolmých osách, ve kterých se šíří konstantní rychlostí. To má při sebemenším ovlivnění symetrie vlákna za následek to, že v jedné polarizační ose se může vlákno šířit jinou rychlostí než ve druhé ose a na výstupu dochází ke zkreslení signálu. Toto narušení symetrie os může být způsobeno mnoha elementy. Není spojena pouze s vlastnostmi optického vlákna, ale také s kvalitou výroby a následné montáže optické trasy. Největší problém je, že PMD se mění v čase a proto je problém jí kompenzovat. Pokud se při měření vyskytne hodnota se zvýšenou PMD, tak se například daný úsek trasy vymění.

### 3. OPTICKÉ PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ FTTx

Optické přístupové sítě neboli OAN (Optical Access Network) se využívají z důvodů jejich velké přenosové rychlosti v koncových bodech. Tato rychlost přenosu může dosahovat až stovek Mbit/s nebo dokonce i Gbit/s a převážně se používají pro připojení velkých společností nebo obchodních center. V dnešní době se už setkáváme i s tím, že optické vlákno je přivedeno až k samotnému koncovému zákazníkovi. Díky jejich vysoké přenosové rychlosti umožňuje podporovat služby jako VOD (Video on Demand), IPTV (s vysokým rozlišením HD) vysokorychlostní datové služby, VoIP (Voice over Internet Protocol) a mnoho dalších. Faktorem, který brzdí rozvoj využívání těchto optických přístupových sítí, se zatím jeví velmi vysoká cena na vybudování trasy i vyšší náklady na pořízení koncových zařízení. [7]

#### 3.1 DĚLENÍ OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍ

Optické přístupové sítě rozdělujeme dle několika parametrů, které jsou přehledně vidět z blokového schématu na obrázku níže (Obr. 8).



Obr. 8: Základní rozdělení optických sítí

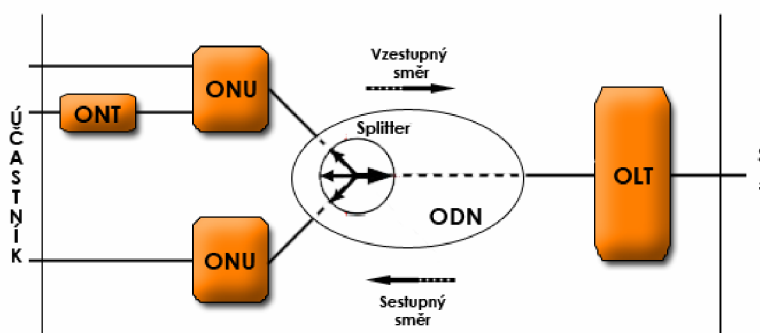
Podle místa, do kterého je přivedeno optické vlákno můžeme rozlišovat několik typů architektur. Obecně tak mluvíme o architekturách (modelech) FTTx.

Model **FTTEx** (Fiber to the Exchange) zde je optické vlákno zakončeno v ústředně. U modelu **FTTCab** (Fiber to the Cabinet) se jedná o zakončení venkovní. Model **FTTN** (Fiber to the Node) je model, u kterého je optické vlákno zakončeno v koncovém uzlu. Model **FTTC** (Fiber to the Curb), kde do účastnického rozvaděče je přivedeno optické vlákno, a koncoví účastníci jsou připojeni pomocí klasického metalického vedení. Dalším modelem je **FTTB** (Fiber to the Building), v tomto případě je optické vlákno přivedeno až do budovy, odkud se poté rozvádí pomocí tzv. vnitřních metalických účastnických rozvodů. Model **FTTO** (Fiber to the Office), u něhož je optické vlákno přivedeno až do kanceláře (místnosti) účastníka. Posledním a v dnešní době také nejvíce zajímavým modelem je **FTTH** (Fiber to the Home), u tohoto modelu je optické vlákno přivedeno až do domu účastníka. [7]

### 3.2 PŘÍSTUPOVÁ SEKCE OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍ

Přístupová sekce optických přístupových sítí se skládá z několika základních funkčních prvků neboli bloků vyobrazených na obrázku (Obr. 9).

Blok **ONT** (Optical Network Terminal) je síťové zakončení, které vytváří rozhraní mezi účastníkem a blokem ONU. Optické ukončující jednotky **ONU** (Optical Network Unit) jsou bloky, které mají za úkol zabezpečit účastnické rozhraní mezi přístupovou sítí a koncovým zařízením. Funkční blok optického linkového zakončení **OLT** (Optical Line Termination) slouží mezi přístupovou a telekomunikační sítí jako síťové rozhraní, které je připojeno k páteřní síti pomocí nějakého vysokokapacitního optického spoje. Mezi blokem OLT a jednotkami ONU je optická distribuční síť **ODN** (Optical Distribution Network), která zajišťuje veškerou komunikaci přístupové sekce. Je tvořena optickými vlákny a optickými rozbočovači (Splittery). [7]



Obr. 9: Schéma přístupové sekce OAN

### **3.3 AKTIVNÍ PŘÍSTUPOVÁ SÍŤ (AON)**

Aktivní přístupové sítě vytváří tzv. vzor pro ostatní přístupové systémy a bývají často nazývány jako integrované přístupové systémy. Hybridní síť je tvořena sloučením vyšší a nižší úrovně. Vyšší úroveň je tvořena optickou částí, nižší úroveň pak technologiemi jako CATV, xDSL.

Aktivní optické sítě jsou tvořeny pomocí aktivních síťových prvků (rozbočovačů, muldexů), které jsou zároveň i velkou nevýhodou tohoto druhu sítě. Důvodem je nutnost zajištění stálého napájení těchto zařízení. Další podstatnou nevýhodou jsou poměrně velké náklady na provoz a údržbu. Na druhou stranu velká výhoda těchto sítí spočívá v dosahování mnohem větších vzdáleností mezi OLT a ONU. Další výhodou je možnost dálkového dohledu a konfigurace. [8]

### **3.4 PASIVNÍ PŘÍSTUPOVÁ SÍŤ (PON)**

V pasivních přístupových sítích PON existuje několik standardů, definovaných dle doporučení IEEE (EPON, GEPON) a ITU-T (BPON, GPON). Tyto jednotlivé standardy se liší v mnoha faktorech, jako například v použitém komunikačním protokolu spojové vrstvy v modelu ISO/OSI, rozdílnou přenosovou rychlostí, množstvím připojených koncových účastníků do dané sítě a také vzdáleností, na kterou jsou schopny komunikovat. [8]

#### **3.4.1 Standard APON/BPON**

Optická přístupová síť APON získala svůj název podle využívané síťové technologie, kterou je ATM (Asynchronous Transfer Module). Je standardizována dle doporučení ITU-T G.983 a pro různé typy provozu. Je schopna zajistit potřebnou kvalitu služeb (QoS) pro danou síť. APON existuje ve dvou variantách, a to symetrická služba a asymetrická služba.

Symetrická služba nabízí přenosovou rychlost 155 Mbit/s (STM1) a asymetrická služba nabízí přenosovou rychlost až 622 Mbit/s (STM4) a to ve směru od OLT k uživateli. Později se začal využívat pojem širokopásmové sítě BPON (Broadband PON). Tato síť vychází ze standardu APON a je doplněna o zvýšenou přenosovou rychlost u symetrické služby na hodnotu 622 Mbit/s.

Pro přenos jsou jako optické přenosové médium použita vlákna G.652 dle doporučení ITU-T. Abychom byly schopni komunikovat po vlákne obousměrným provozem, je zapotřebí pomocí vlnového dělení WDM (Wavelength Division Multiplexing) rozdělit vlnovou délku použitého vlákna na dvě přenosová pásma. Jedno pro vzestupný směr (upstream) a druhé pro sestupný směr (downstream). Pro vzestupný směr se využívá přenosové pásmo v rozmezí 1260 – 1360 nm a sestupného směru je přenosové pásmo v rozmezí 1480 – 1580 nm. Přenos probíhá formou časového multiplexu (TDM), kde se přenáší data v ATM rámcích. [7], [9]

### **3.4.2 Standard GPON (Gigabit Passive Optical Network)**

Jedná se o gigabitovou PON síť, která byla v roce 2006 normalizována dle doporučení ITU-T G.984.1-4, což je rozšíření předchozího standardu G.983. Tato síť může být provozována symetricky i asymetricky. Rozšíření spočívá ve zvýšení přenosové rychlosti zvětšení dělicího poměru, přičemž rozdělení vlnových délek na pásma zůstaly stejné jako v předchozí variantě APON. Přenosové rychlosti ve směru od sítě k uživateli dosahují hodnot 1,25 Gbit/s a 2,5 Gbit/s. Ve směru od uživatele k síti tato přenosová rychlost dosahuje hodnot 155 Mbit/s a 622 Mbit/s. V tomto typu sítě jsou použity splittery s dělicím poměrem 1:64 nebo 1:128 a je zaveden nový komunikační protokol GEM (GPON Encapsulation Method) a pomocí tohoto protokolu přenáší TDM rámce. [7], [9]

### **3.4.3 Standard EPON (Ethernet Passive Optical Network)**

Řešení pasivních optických přístupových sítí na bázi Ethernetu je v dnešní době velmi diskutovaná problematika. Tento model byl poprvé instalován v roce 2001 s přenosovou rychlostí 1,25 Gb/s. Hlavním přínosem rozšíření tohoto standardu je jeho jednoduchost při navazování do koncových sítí, velká rozšiřitelnost a v neposlední řadě také mnohem větší přenosové rychlosti. Tento druh sítě se rozvíjí jako druh řešení IEEE 802.3ah v první míli EFM (Ethernet in the First Mile). Stejně jako u předchozích sítí dochází ve vlákne k rozdělování vlnové délky. Pro směr od sítě k uživateli je vlnová délka 1490 nm a ve směru od uživatele k síti je vlnová délka 1310 nm. Standard definuje maximální dělicí poměr optických odbočnic 1:32 a 1:64. [7], [9]

## 4 METODY PRO MĚŘENÍ ÚTLUMU

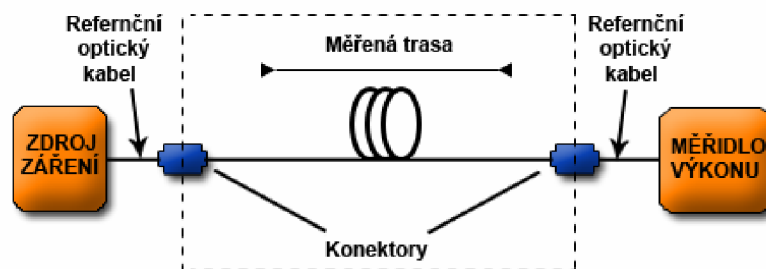
Pro měření útlumu se využívá několika měřících metod, které uvedu v této kapitole. Popsány zde budou postupy pro měření útlumu optických tras přímou metodou, OLTS a OTDR. Pro všechny níže uvedené metody vždy musí platit, že před měřením musí být všechny optické spojky řádně očištěny. Doporučuje se čistotu a kvalitu použitých spojek ověřit pomocí inspekčního mikroskopu. Dále musí platit, že měření by se mělo provádět za použití kvalitních měřících zařízení, které prošli kalibrací a dají se považovat za přesné a bez poruchy. V případě zjištění poškození nebo znečištění je nutno dané zařízení opravit, vyměnit nebo očistit.

### 4.1 PŘÍMÁ (TRANSMISNÍ) METODA

Charakteristickým rysem pro měření přímou metodou je použití dvou samostatných měřících přístrojů umístěných na obou koncích měřeného úseku nebo trasy. Funkcí prvního zařízení je vytvářet zdroj optického záření a funkcí druhého je měření optického výkonu. Měření se provádí na vláknech bez provozu a měří se na vlnových délkách 1310/1383/1490/1550 nm. Tato metoda se nevyužívá pouze pro měření celkového optického útlumu trasy, ale slouží také pro kontrolu toho, zda není dané vlákno prasklé nebo zda se na trase nevyskytují ohyby (mikroohyby, makroohyby).

#### 4.1.1 Sestava pro měření přímou metodou

Na obrázku (Obr. 10) je uvedeno schéma pro měření útlumu přímou metodou, které se může lišit počtem použitých referenčních kabelů. Pro přímou metodu se používají dva přístroje a to zdroj záření a detektor záření (zařízení pro měření optického výkonu). Touto metodou se převážně měří celkový útlum optických vláken jednovidových i mnohovidových. Tato metoda je proti metodě OTDR výhodnější z hlediska ceny přístrojů a rychlosti měření. Měření optických vláken se provádí většinou obousměrně. Nevýhodou je proto fakt, že se musí měřit na dvou různých místech – což je nepohodlné. Postup totiž spočívá v tom, že nejprve se oba přístroje zkalibrují (tzn. nastaví se referenční hodnota) a poté se přístroje umístí na konce optických tras a změří se hodnoty. To samé se provede i pro měření z druhé strany.



Obr. 10: Schéma měřící soupravy pro přímou metodu

Pro měření jednovlákenných vláken (SM) se jako zdroj záření používají laserové zdroje, které se liší svými vlastnostmi a mohou negativně ovlivnit naměřené výsledky. Existuje mnoho různých druhů zdrojů zařízení a je tedy velmi důležité vybrat pro dané měření ten nejvhodnější. Jednotlivé typy se mohou lišit například svou vyzařovací vlnovou délkou, stabilitou anebo také velikostí výstupního výkonu. Zdroje záření u vláken jednovlákenných pracují na provozních vlnových délkách 1310/1383/1490/1550 nm. Vlnová délka se u různých zdrojů může lišit až o 20 nm od udávané hodnoty.

Stejně jakou u zdrojů záření, tak i u měřidel optického výkonu je důležité dbát na kvalitu a stabilitu vlnové délky použitého přístroje. Vybrat ten správný měřicí přístroj není jednoduché, proto je nutné se zaměřit na několik parametrů, které nám mohou ovlivnit naměřené výsledky. Je důležité použít přístroj, který je schopen měřit přesně výkon vycházející z optického vlákna s co nejmenší odchylkou. Dále je potřeba, aby použitý přístroj byl schopen tento výkon měřit na celém svém dynamickém rozsahu (linearita). Většinou se při měření uvažuje dynamický rozsah od -40 dB do -60 dB. Přístroje bývají většinou na vyšších úrovních výkonu přesnější a dosahují odchylek řádově několika desetin dB (kvalitní přístroje mohou mít odchylku pod 0,1 dB), přičemž na úrovních nižších mohou dosahovat chyb až o několika dB (v nejhorším případě i přes 5 dB). [13], [14]

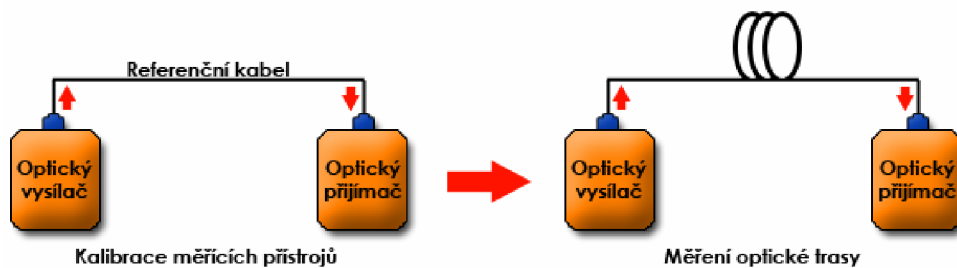


#### 4.1.2 Varianty přímé metody

Pro měření útlumu pomocí přímé metody se používají tři druhy měřících metod, které jsou popsány níže. Dříve se označovaly jako metoda A1, A2, A3, ale v dnešní době se spíše používá označení 1a, 1b, 1c. Všechny tyto tři typy metod se liší pouze počtem použitých měřících referenčních kabelů (délka cca 2 m).

##### **Metoda 1a (A1)**

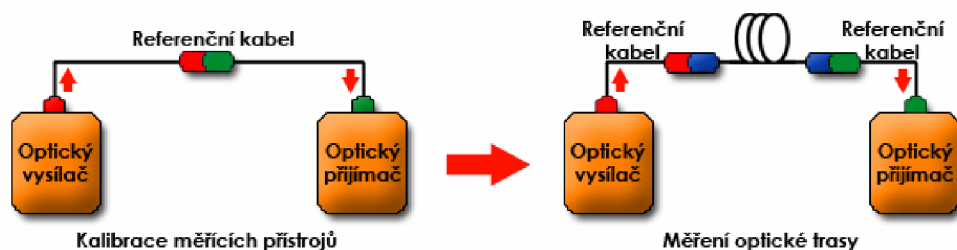
Tato metoda se používá při měření nově vybudované optické trasy (patchpanel - patchpanel). Pro měření se využívá pouze jednoho referenčního kabelu, který se po zkalibrování přístrojů odpojí a místo něj se připojí měřená trasa. [12]



Obr. 11: Schéma měřící varianty A1

##### **Metoda 1b (A2)**

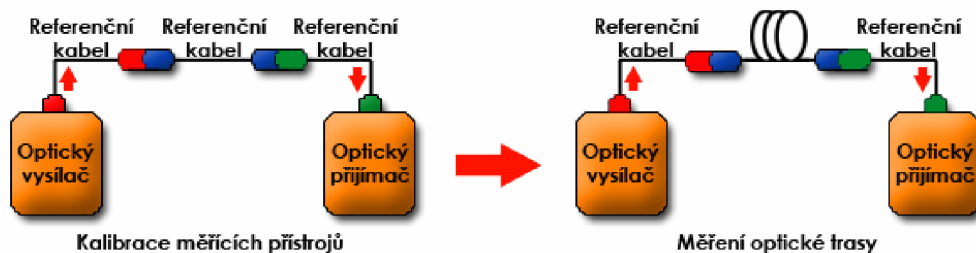
Pro metodu 1b je charakteristické, že využívá dvou měřících referenčních kabelů. Po zkalibrování přístrojů se oba referenční kabely rozpojí a mezi ně se připojí daná měřená trasa. V praxi se však tuto metoda nedoporučuje používat. Důvodem je to, že při kalibraci přístrojů jsou oba referenční kabely navzájem propojeny pomocí jednoho konektoru a po připojení měřené trasy mezi oba referenční kabely měříme útlum přes dva konektory, což ovlivní měření způsobené útlumem druhého konektoru. [12]



Obr. 12: Schéma měřící varianty A2

## Metoda 1c (A3)

Poslední metodou je metoda 1c, která se používá pro měření kompletní přenosové trasy (patchcord – patchcord). Pro samotné měření využívá tři měřících referenčních kabelů. Jakmile jsou přístroje zkalibrovány, odpojí se prostřední referenční kabel a místo něj se připojí měřená trasa. [12]



Obr. 13: Schéma měřící varianty A3

### 4.1.3 Vlivy ovlivňující naměřené výsledky

Faktorů, které nejvíce ovlivňují měřené výsledky při měření útlumu v optických vláknech přímou metodou, je velmi mnoho. Chyby mohou být způsobeny použitím nekvalitních měřících kabelů a konektorů, které mohou být nějakým způsobem poškozeny nebo znečištěny. Je také důležité před samotným měřením dobře zvolit typ reference (1a, 1b, 1c), která nám také může značně ovlivnit naměřené výsledky.

V praxi však jsou nejsilnějším faktorem ovlivňujícím naměřené výsledky samotné vlastnosti měřících přístrojů, proto je zapotřebí používat přístroje nepoškozené, neznečištěné a také hlavně zkalibrované. Kalibraci přístrojů provádějí specializované firmy nebo ústavy. [11]

## 4.2 METODA PŘÍMÁ - PŘÍSTROJ OLTS (Optical Loss Test Set)

Měření metodou přímou přístrojem OLTS se od přímé měřící metody příliš neliší, hlavní rozdíl tohoto měření je v použitých přístrojích. Každý měřící přístroj obsahuje jak zdroj optického záření, tak i přijímač optického záření (realizován wattmetrem). Jedná se o velkou výhodu, protože optické trasy se měří v obou směrech a odpadá tím problém s přepojováním jednotlivých měřících přístrojů z jednoho konce měřené trasy na druhý. Existují dva typy těchto přístrojů, a to manuální nebo automatické. Ačkoli jsou automatické přístroje podstatně dražší než manuální, jsou spíše doporučovány, protože

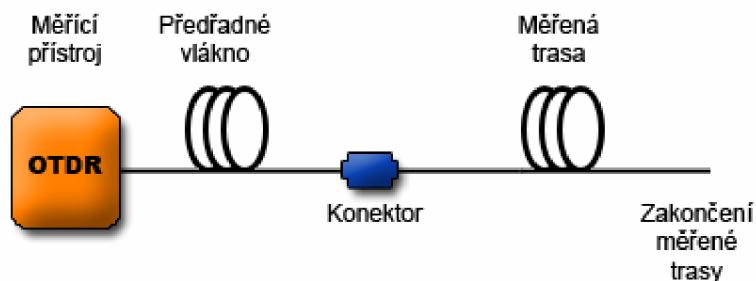
ušetří spoustu času a snižuje se tím i pravděpodobnost vzniku chyby ze strany obsluhy. Pomocí této metody jsme schopni měřit jak vložný útlum vlákna (OIL – Optical Insertion Loss) tak i útlum odrazu (ORL – Optical Return loss). Kalibrace těchto přístrojů se provádí tak, že na zdroji nastavíme určitou úroveň výkonu a tato informace je poslána v datové formě přes měřenou optickou trasu až k detektoru v druhém přístroji. [15]

### 4.3 METODA OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)

Pro měření se využívá měřicí přístroj zvaný optický reflektometr OTDR. Rozdíl ve způsobu měření oproti metodě transmisní je ten, že se celé měření provádí z jednoho konce měřeného optického vlákna. Měří se optický výkon, který je rozptýlen Rayleighovým rozptylem při průchodu vláknem a dále se na koncích měřené trasy měří Fresnelův odraz, který vzniká na spojích. Výkon odražený zpět se poté pomocí optického reflektometru snímá a vyhodnocuje s výkonem vyslaným do vlákna.

#### 4.3.1 Sestava pro měření metodou OTDR

Metodou OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) se dá měřit mnoho parametrů optických vláken, jako například útlum vlákna po celé délce nebo jen útlum v jeho určitých úsecích, útlum na konektorech nebo svárech. Dále se dá určit homogenita daného vedení, délka vedení, je možné dokonce přesně určit místo poruchy, což u metody transmisní či OLTS nebylo možné. Na obrázku (Obr. 14) je uvedeno blokové schéma měřicí soupravy pro měření metodou OTDR. [13]



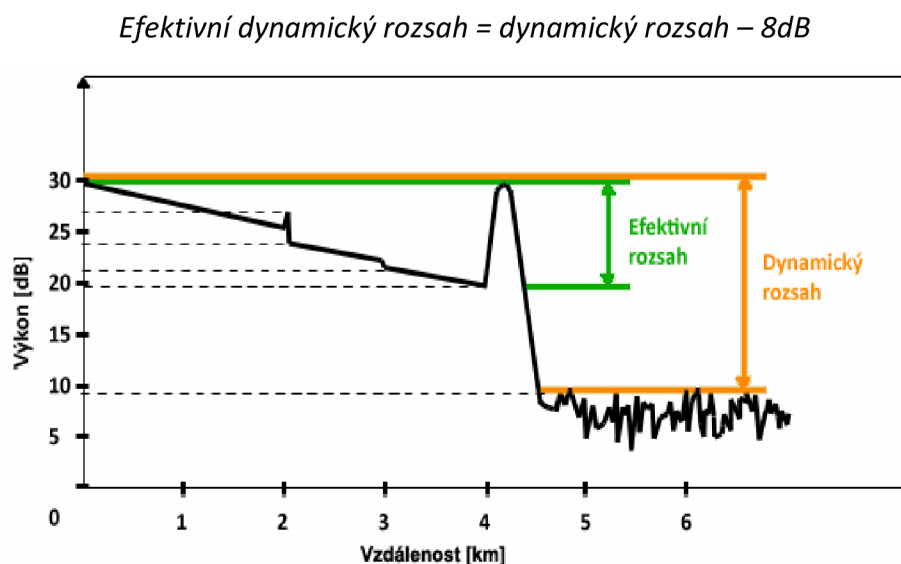
Obr. 14: Sestava měřicí soupravy pro metodu OTDR

### 4.3.2 Optický reflektometr

Optický reflektometr je měřicí zařízení, které slouží jako optický vysílač a přijímač optického záření v jednom. Každé toto zařízení je charakterizováno několika důležitými parametry, na které by se měl klást důraz při samotném měření nebo při jeho přípravě.

#### **Dynamický rozsah**

Mluví-li se o pojmu dynamický rozsah (dB), je zapotřebí ještě uvést pojem efektivní dynamický rozsah (dB), který nám udává hodnoty, ve kterých je měřicí přístroj ještě schopen měřit nehomogenity na reflektogramu. Dynamický rozsah naopak udává rozdíl mezi úrovněmi signálu a šumu. [13], [14]



Obr. 15: Rozdíl mezi dynamickým a efektivním rozsahem

#### **Mrtvé zóny (Attenuation Dead Zone).**

Tento parametr je závislý na vysílané šířce impulsu. Vzniká u odrazných nehomogenit na trase. Největší mrtvou zónu pozorujeme v místě připojení přístroje OTDR, respektive předřadného vlákna. Mrtvé zóny lze rozdělit na dva druhy, a to identifikační mrtvá zóna (dead zone) a útlumová mrtvá zóna. Hlavní rozdíl mezi těmito mrtvými zónami je v tom, že identifikační mrtvá zóna je dána vzdáleností dvou odrazných ploch pro spolehlivé určení místa poruchy, kdežto útlumová mrtvá zóna určuje velikost odrazu za poruchou. [13], [14]

## ***Linearita***

Abychom byli schopni dosahovat co nejlepších výsledků při samotném měření, je zapotřebí použít co nejlineárnější přístroj. Jedná se tedy o parametr, který je zásadní pro měření optického útlumu. Linearita udává schopnost měřicího přístroje měřit útlum s co nejlineárnějším průběhem (schopnost měřit přesně v celém svém dynamickém rozsahu s co nejmenší odchylkou). Tento parametr ovlivňují vlastnosti přístroje nebo jeho programové vybavení. [13], [14]

## ***Vlnové délky***

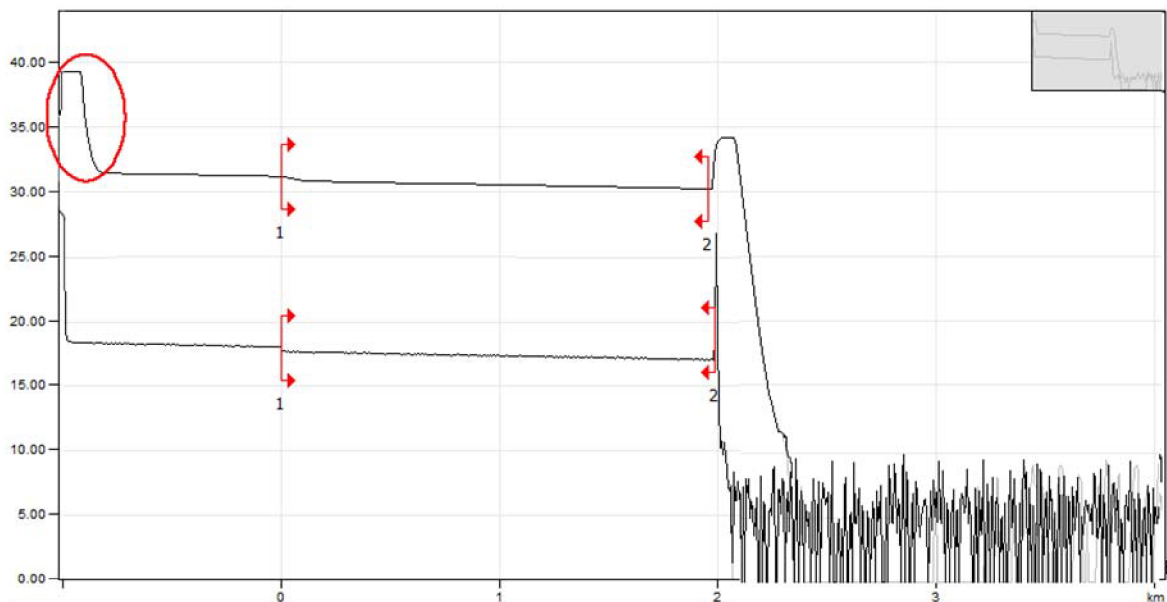
Přístroje OTDR se používají pro měření všech vlnových délek. Pro jednovidová vlákna (SM) se jedná o vlnové délky 1310/1490/1550 nm pro vlákna mnohovidová jsou vlnové délky 850/1300 nm. Pro měření na trasách s provozem se využívá vlnové délky 1625/1650 nm. Před měřicí přístroj je potřeba připojit filtr, abychom měřili vybranou vlnovou délku. Pokud by se na vstupní detektor dostala provozní vlnová délka s vysokým výkonem, mohlo by dojít k poškození přístroje. Nově se také měří na vlnové délce 1383 nm (oblast OH peak). V této oblasti mají optická vlákna typu All Wave nízký útlum a proto jsou vhodná pro nasazení pro tuto vlnovou délku. Starší typy vláken mají optický útlum okolo 1,1 dB. Obecně platí, že s počtem vlnových délek stoupá i cena přístroje.[13], [14]

## ***Závislost měřicího impulsu na délce předřadného vlákna***

V tabulce (Tab. 1) jsou popsány parametry jako délka mrtvé zóny, dynamický rozsah a doporučená délka předřadného vlákna v závislosti na délce měřicího impulsu. Jak už je patrné, se zvyšující se délkou měřicího impulsu se ostatní hodnoty také zvyšují. Nežádoucí efekt je zvyšování mrtvé zóny, kdežto zvýšení dynamického rozsahu je naopak efekt žádoucí.

Tab. 1: Porovnání závislosti délky předřadného vlákna, dynamického rozsahu a délky mrtvé zóny na délce měřícího impulsu. [14]

Délka měřícího impulsu [ns]	Délka mrtvé zóny v místě připojení přístroje [m]	Dynamický rozsah [dB]	Doporučená délka předřadného vlákna [m]
10	30	9,7	100
30	50	12,1	200
100	70	21,0	
275	100	24,1	500
1000	200	27,3	
2500	400	30,0	1000
10000	1200	40,0	2000
20000	2300	42,9	3000



Obr. 16: Vliv délky měřícího impulsu na měření

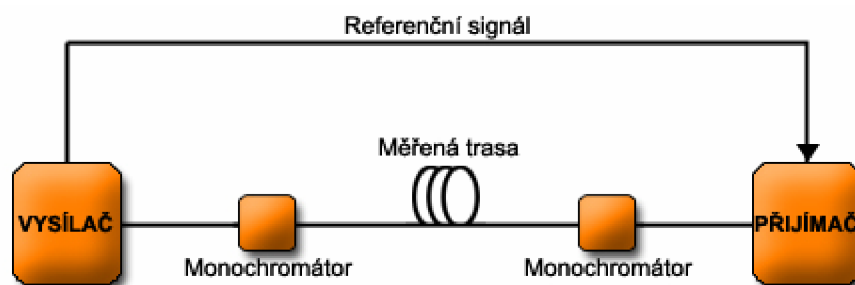
Na obrázku (Obr. 16) je vidět vliv délky měřícího impulsu na výsledné měření. Pro porovnání byl použit impuls o délce 10 ns (horní náměr) a impuls o délce 1 $\mu$ s (dolní náměr). Jak je patrné z obrázku, je výhodnější použití kratších impulsů z důvodů přesnějšího měření. Při použití kratšího impulsu dosáhneme lepší mrtvé zóny na úkor menšího dynamického rozsahu. Naopak při použití delšího impulsu jsme schopni získat větší dynamický rozsah, ale horší mrtvou zónu. Na obrázku (Obr. 16) je červenou elipsou označena oblast, kde můžeme vidět vliv delšího impulsu. V tomto případě nebudeme schopni změřit dvě nehomogenity, které budou těsně za sebou.[14]

## 5 METODY PRO MĚŘENÍ CHROMATICKÉ DISPERZE

Tato kapitola by měla v praxi sloužit jako pomůcka při měření chromatické disperze optických vláken. K měření chromatické disperze optických vláken se používá několika měřících metod a jejich princip měření bude popsán níže. Všechny uvedené metody jsou relativně přesné, jejich přesnost je závislá na parametrech a stabilitě použitých měřících přístrojů, ale také i na kvalitě ostatních použitých komponentů. Přesnost jednotlivých měřících metod je už na takové úrovni, že není problém měřit konstantu chromatické disperze  $D$  s přesností na desetiny a setiny ( $\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ ). Dále jsme schopni určit vlnovou délku nulové chromatické disperze daných vláken, a to s přesností na nm. Stejně jako při měření útlumu musíme udržovat všechny optické spojky a přístroje čisté a nepoškozené. [16]

### 5.1 METODA FÁZOVÉHO POSUVU A DIFERENCIÁLNÍHO FÁZOVÉHO POSUVU

Měřící metoda fázového posuvu je referenční měřící metoda a je definována podle doporučení ITU-T G.650 pro měření chromatické disperze (CD) optických vláken. Na obrázku (Obr. 17) je vyobrazena měřící souprava. Princip této metody spočívá v tom, že vysílač vysílá vstupní modulovaný signál přes monochromátor do optické trasy pomocí několika vlnových délek, který se na straně přijímače detekuje. Jako přijímač se nejčastěji používají přístroje, které měří danou fázi signálu procházejícího optickou trasou (vektorvoltmetr). Abychom byly schopni zjistit zpoždění signálu, je zapotřebí pomocí referenčního kabelu (např. jiného vlákna v kabelu) přivést do přijímače referenční optický signál, a tyto dva signály se poté porovnat, z čehož zjistíme jejich rozdílnou fázi (jejich zpoždění). [16]

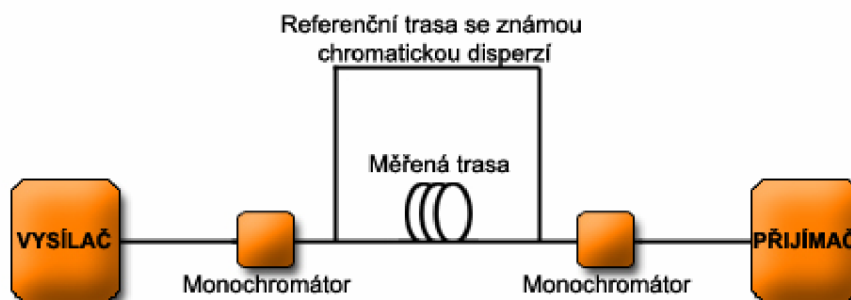


Obr. 17: Měřící souprava pro metodu fázového posuvu

Měřicí metoda diferenciálního fázového posuvu je oproti měřicí metodě fázového posuvu více využívána při měření v terénu. Měřicí souprava je stejná jako na obrázku (Obr. 16), ale hlavním rozdílem je to, že touto metodou se měří fázový rozdíl signálu na několika vlnových délkách. Neporovnává se referenční signál s měřeným signálem, jak tomu bylo v předchozí metodě a tudíž není potřeba používat referenční trasu pro přivádění referenčního signálu. U této metody se také používají pro měření dvě vlákna, z nichž jedno slouží pro komunikaci s vysílačem (komunikační kanál) a druhé je samotná měřená trasa. Po komunikačním kanále se od přijímače k vysílači přenášejí informace, které slouží pro ovládání použitého vysílače (nastavení vlnové délky a modulační frekvence). [16]

## 5.2 METODA INTERFEROMETRICKÁ

Tato měřicí metoda se převážně využívá pro laboratorní účely na měření krátkých optických tras do 10 m nebo pro měření optických součástí. Na měření rozsáhlých optických tras tato metoda vhodná není, a proto se ji nedoporučuje pro tento typ měření používat. K samotnému měření touto metodou se využívá interferometru a to buď Mach-Zehnderova nebo Michelsonova. Na obrázku níže (Obr. 18) je uvedena měřicí souprava pro měření interferometrickou metodou, která se skládá z vysílače, dvou monochromátorů sloužících pro výběr vlnových délek, přijímače a referenčního kabelu o známé chromatické disperzi (můžeme použít krátké optické vlákno nebo spoj realizovat vzduchem pomocí optické soustavy). Princip spočívá v tom, že na straně přijímače (detektoru) dochází k interferenci signálu měřené a referenční trasy. Při změně délky dané referenční trasy se nám na straně přijímače mění fázový rozdíl obou měřených signálů. [16]

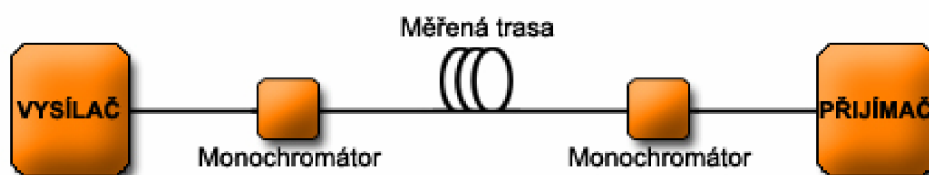


Obr. 18: Měřicí souprava pro metodu interferometrickou



### 5.3 METODA ZPOŽDĚNÍ IMPULSŮ V ČASOVÉ OBLASTI

Měřicí souprava pro měření disperze touto metodou je uvedena na obrázku (Obr. 19). Stejně jako u ostatních metod se jako zdroj optického záření dají použít LED nebo LASER diody a pro výběr vlnových délek slouží monochromátor. Princip této metody je takový, že zdroj vysílá do měřené optické trasy skupinu optických impulsů. Charakteristické je, že tyto impulsy jsou vysílány v přesně stanovených časových rozestupech a na různých vlnových délkách. Chromatická disperze se ve vlákne projevuje zpožděním daných vstupních impulsů při průchodu měřenou optickou trasou a tento rozdíl mezi rozestupy udává velikost zpoždění. Pokud nastane situace, kdy velikost zpoždění impulsů bude větší než velikost rozestupů impulsů, může dojít k záměně pořadí vstupních impulsů a díky této záměně docílíme chybného měření. Jaké největší zpoždění (disperzi) je možné na dané optické trase měřit, udává velikost rozestupů mezi optickými impulsy na vstupu měřené trasy. [16]



Obr. 19: Měřicí souprava pro zpoždění impulsů v časové oblasti

## 6 METODY PRO MĚŘENÍ POLARIZAČNÍ VIDOVÁ DISPERZE (PMD)

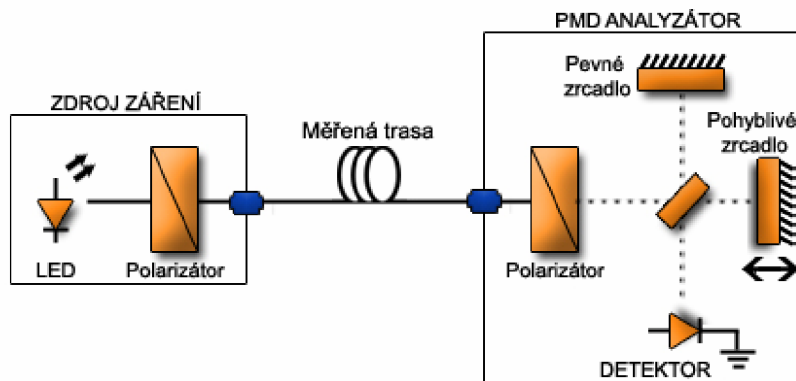
Problém s polarizační vidovou disperzí (PMD) se objevil až v době nástupu vysokorychlostních systémů, kde přenosová rychlost dosahuje řádově desítek Gbit/s. Při nízkých přenosových rychlostech se vliv polarizační vidové disperze neměřil a to proto, že dosahoval zanedbatelných hodnot. Pro měření tohoto typu disperze se nejčastěji používala interferometrická metoda (TINTY), o které zde budu psát. V dnešní době se naopak používá nová varianta této metody nazvaná GINTY, která přináší mnohá vylepšení. Nastíním i princip měření PMD pomocí polarizačního reflektometru P-OTDR. [17]

Opět platí, jako v předchozích dvou kapitolách, že musíme dodržovat všechny optické prvky, jako konektory a měřicí přístroje, čisté a nepoškozené. Dodržení těchto základních požadavků nám umožní provádět přesná a kvalitní měření.

### 6.1 METODA TINTY (Traditional analysis INTY)

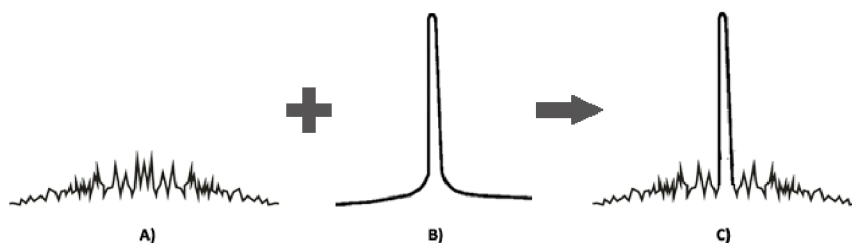
Interferometrická metoda TINTY byla jednou z nejpoužívanějších metod, sloužící pro měření polarizační vidové disperze (PMD) optických vláken, převážně v terénu. Její velkou předností a také důvodem jejího využívání je rychlost měření, která dosahuje řádově několika sekund. Jedná se o jednoduchou metodu, u které není zapotřebí určovat referenční hodnoty pro měření. Na obrázku (Obr. 20) je uvedena měřicí souprava pro tuto metodu, která se skládá ze dvou základních částí (zdroj záření a PMD analyzátor). Mezi tyto dvě části je připojena námi měřená trasa.

Princip metody TINTY spočívá v interferenci nízko koherentního záření (LED diody) vstupujícího přes polarizátor do měřené optické trasy. Tento signál šířící se optickou trasou je ovlivňován účinky PMD. Tyto účinky se poté měří PMD analyzátozem, který je tvořen polarizátorem, dvěma zrcadly (pevné a pohyblivé), detektorem a Michelsonovým interferometrem. Funkce PMD analyzátoru spočívá v tom, že signál vycházející z měřené trasy postupuje přes polarizátor do interferometru a zde se rozdělí do dvou ramen. Jedno rameno je zakončeno pevným zrcadlem a druhé je ukončeno zrcadlem pohyblivým. Odtud se poté světelný signál odráží a je detekován pomocí detektoru, kde se získá tzv. interferogram (zpoždění vlivem PMD). Pohyblivé zrcadlo slouží k ovlivňování (zvětšení nebo zmenšení) zpoždění mezi oběma signály. [17]



Obr. 20: Měřicí souprava pro metodu TINTY

Velikost PMD se určí, jak už bylo řečeno, z interferogramu, který je složen ze dvou základních složek. Jedna složka je tvořena vzájemnou korelační funkcí dvou na sobě kolmých signálů odražených od zrcadel (vlivem PMD jsou časově posunuty) a druhou složku tvoří autokorelační funkce měřeného signálu. [17]



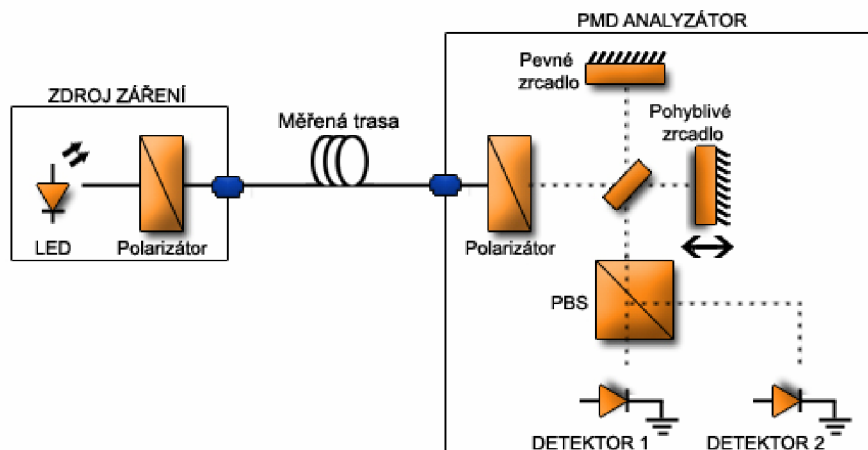
Obr. 21: Složení jednotlivých složek PMD interferogramu

Na obrázku (Obr. 21) jsou vyznačeny jednotlivé složky PMD interferogramu a jejich výsledné složení. Složka A) představuje vzájemnou korelační funkci a složka B) zase autokorelační funkci. Výsledkem složení těchto dvou složek nám vznikne konečný PMD interferogram. Samotná autokorelační funkce je nežádoucí efekt, protože PMD je třeba vyhodnocovat ze vzájemné korelace polarizačních vidů (cross-correlation). Přítomnost autokorelační funkce vlastního měřicího signálu ve výsledném interferogramu způsobuje některá omezení metody TINTY. Velká autokorelační špička (Obr. 21, B)) může svou přítomností a tvarem ovlivnit samotné měření. Šířka a tvar autokorelační funkce jsou dány tvarem spektra měřicího signálu, jsou určeny použitým zdrojem záření a případnými spektrálně závislými prvky optické trasy (vláknové zesilovače EDFA, add-drop multiplexory OADM). Abychom zmírnili vliv autokorelační špičky na měřené výsledky,

existují dvě základní podmínky. První podmínkou je použití zdroje záření se spektrálním průběhem blízcím se co nejvíce Gaussově křivce, a druhou pak aby ani samotná měřená trasa neovlivnila tvar spektra měřícího signálu.

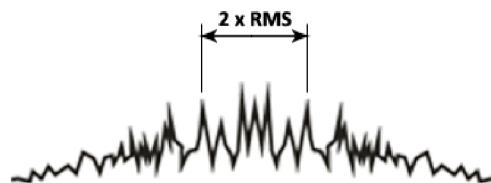
## 6.2 METODA GINTY (Genreal analysis INTY)

Jedná se o novou interferometrickou metodu (GINTY) sloužící pro měření polarizační vidové disperze. Měřící souprava pro tuto metodu, která je uvedena na obrázku (Obr. 22), se od metody TINTY příliš neliší. Hlavním rozdílem je v úpravě měřící sestavy, PMD analyzátor je rozšířen o polarizační dělič (PBS – Polarized Beam Splitter) a druhý optický detektor. Princip spočívá v tom, že optický signál přiveden měřenou optickou trasou je stejně jako v předchozí metodě rozdělen interferometrem do dvou ramen zakončených zrcadly. Odražený signál poté dopadá na polarizační dělič (PBS), který daný signál rozděluje opět do dalších dvou na sebe kolmých ramen tvořených detektory. Na obou detektorech dojde k interferenci a poté je získán interferogram. Na základě znalostí matematických výpočtů jsme schopni oba interferogramy sčítat a odečítat. Sečtením získáváme samotnou autokorelační funkci a jejím odečtením zase získáme vzájemnou korelační funkci.



Obr. 22: Měřící souprava pro metodu GINTY

Velikost PMD u této metody se dá určit už přímo ze vzájemné korelační funkce, protože touto metodou jsme schopni potlačit autokorelační špičku z daného výsledného interferogramu a díky tomu výslednou PMD určujeme přímo z jednotlivých bodů měřeného interferogramu (Obr. 23). [17]



Obr. 23: Interferogram metody GINTY

### 6.3 METODA P-OTDR (Polarization Optical Time Domain Reflectometry)

Jak už bylo řečeno dříve, měření polarizační vidové disperze se dostalo na popředí zájmu až v době, kdy se začaly nasazovat vysokorychlostní systémy. Zpoždění vlivem PMD může být způsobeno i jedním kabelovým úsekem z celé optické trasy a pro tyto účely se velmi hodí použití tzv. polarizačního reflektometru P-OTDR. Tato měřicí metoda se zakládá na známé metodě pro měření Rayleighova zpětného rozptylu (OTDR). Princip spočívá v tom, že do měřené optické trasy se vpustí sled několika impulsů, ze kterých se na základě zpětně rozptýleného záření vyhodnocuje oblast se zvýšenou hodnotou PMD. Závislost polarizační vidové disperze (PMD) se dá jednoduše vyjádřit dle vztahu (6.1).

$$PMD \approx \beta \sqrt{L * h} . \quad (6.1)$$

Jak už je z daného vztahu jasné velikost PMD roste se zvyšující se hodnotou dvojlomu ve vlákne  $\beta$  (ps/km), přičemž hodnota  $L$  udává délku vlákna a hodnota  $h$  udává vazební délku vlákna (tzv. vazbu mezi jednotlivými polarizovanými vidy). Z měření pomocí OTDR získáváme délkové vlastnosti měřeného vlákna, ale pro konkrétní hodnotu PMD budeme ještě potřebovat získat hodnoty jeho lokálního dvojlomu a vazební délky. Tyto hodnoty jsme schopni získat pomocí dvou způsobů analýzy:

- DOP (metoda sledování stupně polarizace)
- SOP (metoda sledování stavu polarizace)

Obě metody analýzy spočívají v tom, že do vlákna jsou vysílány sledy polarizovaných impulsů optického záření, avšak rozdíl mezi těmito dvěma metodami spočívá pouze ve způsobu zapojení v OTDR měřicím přístroji a jejich následném získávání potřebných hodnot.

## 7 MĚŘENÍ PASIVNÍCH OPTICKÝCH SÍTÍ

Měření pasivních optických sítí PON (Passive Optical Network) se doporučuje provádět už při samotné výstavbě optické sítě, což snižuje náklady a čas spojené s pozdějším řešením problémů (vadné sváry, konektory a další součásti systému). Při zajišťování potřebné kvality přenosového systému je důležité dbát na zásady pro správnou instalaci a manipulaci s jednotlivými součástmi optické sítě. Nedodržení pracovních postupů může vést ke zvýšení optického útlumu a tím i zhoršení kvality přenosu informací v rámci sítě. V PON sítích se dělí optický signál mezi několik koncových terminálů pomocí tzv. pasivních odbočnic, ale při velkém dělení mají také velký útlum (např. odbočnice 1:32 má útlum 18dB. Pokud však nemáme měřicí přístroj, který nemá dostatečný dynamický rozsah, pak dojde k tomu, že trasu nebudeme schopni změřit.

Během samotné instalace sítě jsou doporučovány tyto tři měřicí testy:

- Test 1: Obousměrné měření vložného útlumu OIL
- Test 2: Obousměrné měření útlumu odrazu ORL
- Test 3: Obousměrné měření end-to-end charakteristiky

Ideálně by se mělo provádět testování sítě po instalaci každého segmentu, aby se případné závady co nejdříve zjistily a odstranily. Například po instalaci optického kabelu by se mělo přímou metodou provést měření mezi koncem vlákna a OLT (umístěné v centrální stanici), dále po instalaci splitteru by se měl testovat každý jeho výstup se zařízením OLT a nakonec při instalaci drop terminálu (DT) by se mělo měřit mezi každým DT a OLT. [19]

### 7.1 TEST 1: OBOUSMĚRNÉ MĚŘENÍ VLOŽNÉHO ÚTLUMU OIL

Pro testování sítě přímou metodou se nejčastěji používají OLTS měřicí zařízení, které existují v několika variantách (automatické, manuální). Každé toto měřicí zařízení je složeno ze zdroje záření a OPM (Optical Power Meter). Vložný útlum OIL optické sítě je definován jako rozdíl mezi výkonem vyzařovaným zdrojem a výkonem detekovaným na přijímači. Celkový vložný útlum se skládá ze součtu všech segmentů dané optické sítě od OLT po ONT.

Hlavními zdroji útlumu jsou konektory, sváry a optické odbočnice. Útlum odbočnic je závislý na dělicím poměru a odpovídá hodnotě 3 dB u odbočnice s dělicím poměrem 1:2. Tato hodnota se zvyšuje přibližně o 3 dB při každém zdvojnásobení dělicího poměru (tzn. zdvojnásobení počtu výstupů). Takže pro odbočnici s dělicím poměrem 1:32 je vložný útlum roven přibližně 15 dB.

Postup tohoto testu spočívá v tom, že před samotným pospojováním jednotlivých prvků optické sítě je potřeba změřit útlum každého prvku dané sítě. U optických odbočnic je důležité, aby útlum každého výstupu měl stejnou hodnotu. Jakmile je vše pospojované měl by se změřit celkový end-to-end útlum optické trasy mezi DT (drop terminal) a OLT a to v obou směrech.[19]

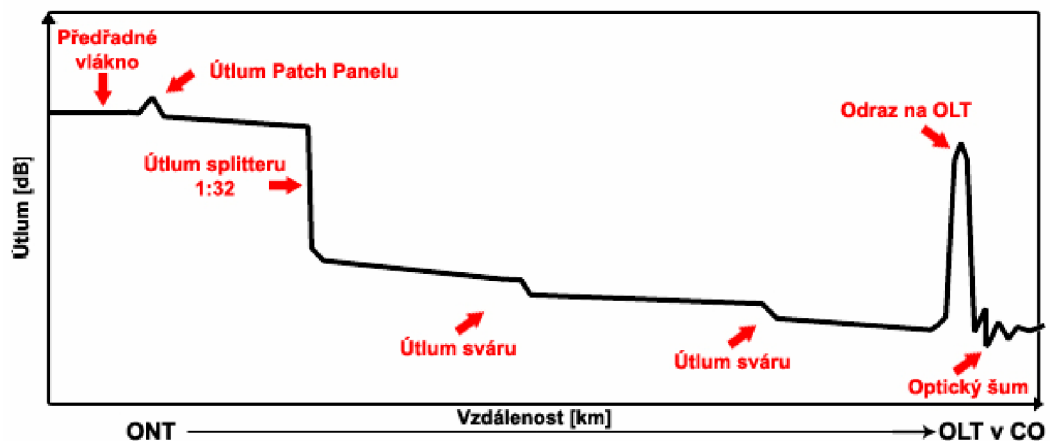
## **7.2 TEST 2: OBOUSMĚRNÉ MĚŘENÍ ÚTLUMU ODRAZU ORL**

Pro testování touto metodou se používá přímá (transmisní) metoda či OTDR. Protože komunikace probíhá obousměrně, je zapotřebí testovat síť z obou směrů (tzn. z obou jejích konců). Zpětný rozptyl udává, kolik světla se odrazí zpět k vysílači. K odrazu dochází na nehomogenitách ve vláknu, v místě svárů a především na konektorech vlivem Reyleighova rozptylu. Minimální hodnota zpětného rozptylu je důležitá především při distribuci analogového videa v pasivních sítích FTTH na vlnové délce 1550 nm, protože vlivem velkého zpětného rozptylu dochází k degradaci kvality přenosu. Při měření se nevyhodnocuje přímo zpětný rozptyl, ale útlum odrazu ORL (Optical Return Loss) a odrazivost (Reflectance). ORL je definovaný jako poměr výkonu přijatého ku odraženému a je měřen nejčastěji pro celou trasu. Obsahuje tedy v sobě dílčí odrazy na nehomogenitách, svárech a konektorech až ke konkrétnímu optickému portu. Na druhou stranu odrazivost je dána poměrem výkonu odraženého ku přijatému a je měřena pro jedno konkrétní rozhraní nebo určitou nehomogenitu ve vláknu. Odrazivost vzniká na nekvalitních prvcích optické sítě (špinavé nebo poškozené konektory či špatně provedené sváry). Snížení tohoto nežádoucího vlivu se dá docílit čištěním nebo použitím kvalitnějších prvků, které mají lepší vlastnosti. Dle doporučení ITU-T G.983.1 a G.984.2 je doporučena minimální hodnota ORL 32 dB. Typické hodnoty útlumu odrazu ORL jsou pro jednotlivé typy konektorů dány následovně: pro konektor typu PC (50-55 dB) a pro konektor typu APC (65-70 dB).

Princip ORL testu spočívá v tom, že nejprve se musí měřicí přístroje navzájem kalibrovat, a poté se doporučuje změřit útlum odrazu na každém segmentu či portu zvlášť. Poté je teprve potřeba celou optickou soustavu pospojovat. Nakonec se musí změřit celkový útlum odrazu celé sítě. [19]

### 7.3 TEST 3: OBOUSMĚRNÉ MĚŘENÍ END-TO-END CHARAKTERISTIKY

Pro tuto metodu se využívá jako měřicí přístroj OTDR, který je schopen poskytnout kompletní informace o všech útlumech dané měřené optické trasy. Jeho velkou předností je schopnost lokalizovat konkrétní místo vzniku útlumových ztrát na jednotlivých elementech sítě. OTDR je schopno testovat optickou trasu na všech vlnových délkách (1310, 1383, 1490, 1550). Opět se doporučuje provádět testování po instalování jednotlivých segmentů sítě. Velmi důležité je toto měření (testování) provádět obousměrně, protože útlum některých událostí (jako jsou spoje mezi nízkoútlumovými a vysokoútlumovými vlákny) je v obou směrech rozdílný. Na obrázku (Obr. 24) je uvedeno vykreslení útlumové charakteristiky optického vlákna měřené od koncového účastníka ONT směrem k OLT v CO. [19]



Obr. 24: Příklad útlumové charakteristiky získaná OTDR ve směru od ONT k OLT [19]



## 8 DOHLEDOVÉ SYSTÉMY

Optické přenosové sítě jsou sestaveny z optických kabelů, aktivních či pasivních prvků, které slouží pro přenos informací. Protože útlum optické trasy je faktor, který nejvíce ovlivňuje kvalitu a vzdálenost přenosu optických informací, je pro správný chod celé sítě potřeba nasazení tzv. dohledových neboli monitorovacích systémů, které budou tématem této kapitoly. Bude zde popsán princip dohledových systémů, ale i metody sloužící pro monitorování na optických sítích.

### 8.1 PRINCIP DOHLEDOVÝCH SYSTÉMU

Monitorovací systémy pro dohled optických sítí se skládají z hardwarového (HW) a softwarového (SW) vybavení. Hlavním úkolem je kontrola kvality, zpracování informací o stavu nebo změnách v optické síti a v případě drobných výchylek či závažných poruch okamžité vyhlášení alarmu a informování příslušného dohledového centra, které má za úkol daný problém vyřešit. Monitorování sítě se provádí pomocí volného vlákna, dále pak pomocí zvláštní vlnové délky nebo pomocí vlnové délky z vyššího přenosového okna.

Monitorování na volném vlákne se provádí pouze na vlákne, které není využíváno k provozu. Slouží pouze ke zjištění změn optických vlastností, které jsou totožné pro všechna vlákna daného sledovaného kabelu (ztráty způsobené nadměrným ohybem kabelu, nebo přerušeni kabelů). [18]

Monitorování pomocí zvláštní vlnové délky je možno provádět jak na vlákne, které je využíváno k přenosu tak na vlákne, které využíváno není. Pojmeme zvláštní vlnová délka je myšlena vlnová délka, která nespadá do přenosového pásma sloužícího pro přenos informací ve vlákne (při monitorování na využívaném vlákne). V tomto případě je zapotřebí použití pasivních prvků (filtry, vlnové multiplexy), které nám zajišťují, aby nedocházelo ke vzájemnému rušení přenosového optického signálu se signálem monitorovacím.

Pomocí vlnové délky z jiného (vyššího) přenosového okna se monitorování provádí dvěma způsoby. Buď tak, že optický systém přenáší užitečné informace pomocí přenosového okna na vlnové délce 1310 nm, což odpovídá přenosovému oknu 1, a tudíž pro monitorování se využije vlnová délka 1550 nm z druhého (vyššího) přenosového

okna. Nebo se použije druhý způsob, který spočívá v tom, že například užitečnou informaci přenášíme na vlnové délce 1610 nm a pro monitorování využijeme z téhož okna vyšší vlnovou délku, která odpovídá například vlnové délce 1650 nm. Důvod, proč využíváme vždy vyšší vlnovou délku nebo vyšší přenosové okno pro monitorování, je ten, že poruchy nebo výpadky se projevují na vyšších vlnových délkách dříve než na nižších, a díky tomu jsme schopni odhalit výpadek dříve, než dojde k samotnému ovlivnění užitečného přenášeného signálu a můžeme tak přecházet nežádoucím ztrátám přenášených informací. [18]

## **8.2 METODY MONITOROVÁNÍ OPTICKÝCH TRAS**

Pro monitorování na optických systémech (sítích) se využívá metoda transmisní, reflektometrická a nebo kombinace těchto dvou metod ARFTS. Budou zde popsány rozdíly a výhody jednotlivých metod.

### **8.2.1 Přímá transmisní metoda**

Jedná se o monitorovací metodu, jejíž hlavní úkol spočívá v neustálém kontrolování útlumu v optické trase a jednotlivé sledované hodnoty útlumu porovnává s referenční hodnotou. Velkou výhodou této metody je, že je schopna rozpoznat i sebemenší odchylky od stanovené referenční hodnoty útlumu a díky této vlastnosti je schopna informovat dohledové centrum o výskytu chyby dříve než vyskytnutá chyba začne ovlivňovat přenosový signál. Proto se kladou velmi vysoké nároky na konstrukci aktivních prvků, které musí být uzpůsobeny trvalému provozu při zachování vysoké citlivosti a schopnosti měřit i velmi rychlé změny útlumu, které mohou dosahovat hodnot 0,1 dB za 300 ms. Dále je zapotřebí uzpůsobit i samotný software, který zpracovává informace o stavu sítě a následně komunikuje s dohledovým centrem, kterému přenáší informace o vyskytnutých odchylkách pomocí SMS nebo e-mailu a to vše v reálném čase. [18]

### 8.2.2 Reflektometrická metoda

Tato metoda pro monitorování parametrů optického systému využívá zařízení OTDR, které porovnává měřené hodnoty s referenčním náměrem. Velkou výhodou proti předešlé metodě transmisní je schopnost určení konkrétního místa, kde se vzniklá chyba vyskytla. Už při drobných netypických odchylkách vyhlašuje alarm a s využitím prvků TMN (Telecommunications Management Network) je schopna daný provoz přesměrovat a zamezit tak nežádoucím ztrátám přenášené informace. Detekované odchylky nebo chyby jsou do dohledového centra přenášena pomocí SMS zprávy, e-mailu nebo jsou zobrazeny v centrále na mapě sestavené pomocí GPS souřadnic, což zjednodušuje obsluhu orientaci, kde se daná chyba vyskytla a urychluje tak následné řešení problému servisním technikům. [18]

### 8.2.3 ARFTS

Kombinací obou předchozích dohledových metod (transmisní, reflektometrické) je metoda ARFTS, která využívá všech jejich nejlepších vlastností. Z transmisní metody si převzala rychlost detekce chyby (milisekundy) a z metody reflektometrické zase přesné určení výskytu chyby. Tato metoda pracuje tak, že trvale se provádí dohled nad útlumovými charakteristikami pomocí metody transmisní a v případě, že je detekována nějaká odchylka dojde k přepnutí na metodu reflektometrickou, která určí přesné místo vzniku a dohledovému centru odešle informace potřebné pro řešení vzniklého problému v optické síti. [18]



Obr. 25: Princip metody ARFTS

V základním stavu při dohledu nad stavem sítě je připojen detektor a zdroj záření (zelený spínač) v případě detekce poruchy je přepnuto na OTDR. Zdroj musí být odpojen z důvodu, aby nedošlo k poškození měřicího přístroje OTDR (modrý spínač).

## 9 NÁVRH METODICKÉ PŘÍRUČKY PRO MĚŘENÍ OPTICKÝCH SÍTÍ

V této kapitole, nazvané jako návrh metodické příručky pro měření klíčových parametrů optických sítí, budou shrnuty potřebné informace pro měření optického útlumu, útlumu odrazu, chromatické disperze a polarizační vidové disperze. Dle doporučení ITU-T G.650.3 jsou přesně definovány druhy měření, které je potřeba provádět na optické trase nebo samostatných optických vláknech před uvedením do provozu nebo při samotné instalaci. Níže jsou popsány soubory měření, které je nutno provádět. Jedná se tedy o:

### Soubor měření 1 :

- Inspekce čel konektorů pomocí optického inspekčního mikroskopu
- Obousměrné měření OIL
- Obousměrné měření OTDR

### Soubor měření 2:

- Měření stejné jako v testu 1
- Měření ORL (útlum odrazu)
- Měření chromatické disperze CD
- Měření polarizační vidové disperze PMD

### 9.1 MĚŘENÍ OPTICKÝCH SÍTÍ – soubor měření 1:

Soubor měření 1 je zaměřen především na měření optických prvků sítě jako konektorů, svárů i samotných optických vláken. Cílem je přesvědčit se o kvalitě provedené montáže a určit zda všechny prvky splňují předem stanovené normy. V případě, že by se vyskytly odchylky od stanovených norem je zapotřebí danou část sítě vyměnit. [20]

Tento druh měření se provádí vždy, ať už při samotné výstavbě nebo při kontrolním měření. Jako první se ověřují útlumové vlastnosti optické trasy včetně jejich spojovacích optických prvků (konektory, sváry), které by mohly neblaze ovlivnit kvalitu optického systému. Všechna potřebná kritéria jsou stanovena normou ITU-T a definují

například jaký má mít optická trasa nebo určitý prvek vložený útlum či útlum odrazu. Při určování daných kritérií je důležité brát v potaz, jak dlouhá bude trasa a kolik bude na trase optických spojů. Dále je důležité vědět, zda se měření bude provádět pro vysokorychlostní přenos dat vyšší jak 10 Gbit/s nebo ne, a na základě těchto znalostí dodržovat dané limity útlumů. V případě, že tato síť bude provozovat vysokorychlostní systémy DWDM, bude kromě útlumu potřeba měřit i disperzní vlivy jako chromatickou disperzi či polarizační vidovou disperzi (viz soubor měření 2). [20]

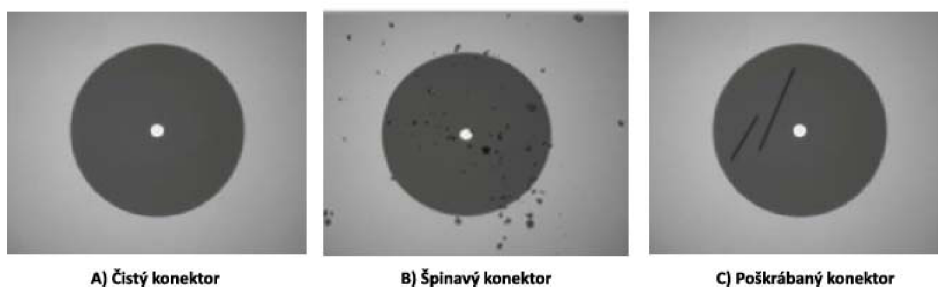
### 9.1.1 Kontrola čel konektorů

Ještě před samotným zahájením měřících zkoušek se doporučuje provést kontrola čel konektorů na všech koncích měřené optické trasy. To se provádí proto, aby byly odhaleny veškeré nečistoty a poškození, které by následně vedly k nespolehlivým výsledkům měření. Nejvíce problémů vzniklých na optických sítích je převážně způsobeno vadami na konektorech, spojkách a různých optických průchodkách. Zdrojem znečištění mohou být nejen ruce, vzduch, ochranné čepičky, ale i samotné měřicí přístroje. Tyto nečistoty mohou dosahovat velikosti 2-5  $\mu\text{m}$ , což je pouhým okem k nerozeznání, a proto se k jejich odhalení nejčastěji používají tzv. optické inspekční mikroskopy (Obr. 26). [21]



Obr. 26: Inspekční mikroskop pro kontrolu kvality a čistoty čel optických konektorů

Po připojení mikroskopu k čelu kontrolovaného konektoru se nám na displeji zobrazovacího zařízení ukáže míra znečištění čela konektoru (Obr. 27). Na obrázku A je zobrazen čistý konektor, na obrázku B konektor špinavý a na obrázku C je konektor poškrábaný (mechanicky poškozený). [21]



Obr. 27: Čela optických konektorů pod mikroskopem

V případě, že jsou inspekčním mikroskopem odhaleny drobné nečistoty nebo dokonce poškození, je zapotřebí tyto vady odstranit. Pokud je konektor poškozený, nezbývá než daný konektor vyměnit za nový. Pokud je konektor pouze znečištěný, stačí ho očistit a kontrolu provést opětovně. K čištění konektorů se využívá celé řady čistících pomůcek. Můžeme použít například čistící bezvláknité kapesníčky, tyčinky nebo kazety dále pak Isopropyl alkohol, stlačený vzduch a mnoho dalších přípravků dostupných na trhu. Na obrázku (Obr. 28) jsou zobrazeny některé z mnoha pomůcek, se kterými jsem se setkal při praktickém měření. [21]



Obr. 28: Pomůcky pro čištění čel konektorů

### **Postup čištění konektorů:**

Z konektoru, který chceme očistit, je nutné nejdříve odstranit ochrannou čepičku a poté se provede suché čištění bezvláknitým papírem (kapesníkem) nebo můžeme použít čistící kazetu. Po očištění připojíme konektor k sondě inspekčního mikroskopu a prohlédneme si čelo - zda je čisté a bez poškození. V případě, že by byl konektor stále špinavý, je nutné použití mokrého čištění navlhčením bezvláknitého papíru v isopropyl alkoholu a následné vysušení bezvláknitým papírem nebo čistící kazetou. Opět provádíme kontrolu inspekčním mikroskopem. Toto čištění by se mělo provádět vždy, když se s daným konektorem manipuluje. [21]

### **9.1.2 Útlum optické trasy**

Měření útlumu je jedním z nejdůležitějších parametrů při měření optických sítí bez ohledu na přenosovou rychlost. Nejčastěji se měří celkový optický útlum a to pro všechny vlnové délky, na kterých bude daná síť provozována. Běžně se měření provádí pro vlnovou délku 1310 nm a 1550 nm, pokud však uvažujeme provoz v L-pásmu, pak se měření provádí i na vlnové délce 1625 nm. Pro měření se používá řada měřících metod. Jedná se o metodu přímou (OLTS) a metodu OTDR, které jsou podrobně popsány v kapitole 4 [Metody pro měření útlumu].

Při měření přímou metodou se doporučuje měření provádět v obou směrech a pro všechna vlákna optické trasy. Pro tuto metodu je zapotřebí zdroj záření a měřič optického výkonu. V případě OLTS odpadá nutnost přesouvat se z jednoho místa na druhé, protože měřicí přístroje v sobě mají integrovaný jak zdroj, tak i měřič. Útlum měřeného vlákna by měl být v obou směrech podobný a výsledná hodnota je pak daná jako aritmetický průměr těchto hodnot. V případě větších odchylek útlumů pro oba směry se doporučuje použít metodu OTDR, která nám umožní lokalizovat přesné místo vzniku chyby. Touto metodou je možné měřit pouze z jednoho konce, ale pro větší přesnost se doporučuje měření provádět z obou konců měřené trasy. Metodou OTDR jsme schopni odhalit špatný svár, špatný konektor nebo také zlomení vlákna. Touto metodou je možno měřit optický útlum trasy i jednotlivých částí, dále pak útlum odrazu, ale i útlum jednotlivých prvků daného optického systému. [20]

### **9.1.3 Útlum a lokalizace optických spojů a další parametry optických tras**

Pro určení všech parametrů optické sítě se nejčastěji doporučuje měření provádět metodou OTDR, která je podrobně popsána v kapitole 4 [Metody pro měření útlumu] nebo v doporučení IEC 61280-2.

Při uvedení nového kabelu do provozu se testování provádí metodou OTDR, a to obousměrně pro každé vlákno. Měření by se mělo provádět nejméně na dvou vlnových délkách. Vlnové délky, na kterých chceme měřit, by se měly vybrat podle toho, pro jaký provoz budou vlákna sloužit. Vlnová délka 1310 nm a 1550 nm se nejčastěji používá pro vlákna dle doporučení ITU-T G.652, kdežto vlnové délky 1550 nm a 1625 nm se používají pro vlákna dle ITU-T G.655.

Dále se při měření doporučuje použití dostatečně dlouhého předřadného vlákna, které slouží pro eliminaci mrtvé zóny. Díky tomu jsme schopni změřit i konektor hned za měřicím přístrojem, který by mohl být bez použití předřadného vlákna pro měřicí zařízení neviditelný, a měření by bylo nepřesné. Po změření optické trasy jsme schopni z OTDR náměru přesně analyzovat celou optickou trasu včetně jednotlivých kabelových úseků, konektorů a svárů, dále můžeme určit délku trasy, útlum odrazu i útlum celé optické trasy. V případě, že by se na jakémkoli prvku trasy objevily odchylky od stanovených limitů, jsme na základě náměru schopni určit i přesné místo výskytu daného problému a tento problém odstranit.

Na trhu existuje celá řada OTDR měřicích zařízení, jejichž cena se odvíjí od mnoha faktorů, jako například na jakých vlnových délkách můžeme měřit, jak moc jsou stabilní při měření, jaký mají výkon a mnoho dalších parametrů. Proto se doporučuje při výběru zařízení poradit s výrobcem a následně vybrat přístroj, který bude nejvhodnější pro dané měření. [20]

### **9.1.4 Ostatní parametry, které je potřeba změřit po instalaci**

Kromě měření optického útlumu se dále na optických sítích měří i parametry, které nemají až tak zásadní vliv na přenosovou rychlost celého systému, ale spíše ovlivňují mechanické vlastnosti vlákna. Měří se například tloušťka pláště, pevnost v tahu apod. Zatím nejsou pro toto měření stanoveny žádná standardy, avšak při vytváření optických sítí by se měly zahrnout do projektů. Mohla by například nastat situace, kdy je na určité



místo instalováno vlákno, které není vhodné pro dané prostředí a může být tedy na základě vnějších vlivů poškozeno. [20]

## **9.2 MĚŘENÍ OPTICKÝCH SÍTÍ – soubor měření 2:**

Soubor měření 2 je typ zkoušky, která je definována jako charakterizace vláken. Poukazuje na měření, která mohou být provedena ke splnění předem stanovených provozních podmínek, například pro určení, zda daná síť vyhovuje pro vysokorychlostní systémy DWDM s přenosovou rychlostí vyšší jak 10 Gbit/s nebo zda se dá toto měření použít i tehdy, chceme-li stávající systém rozšířit i o jiné vlnové délky nebo jen prostě ověřit, zda síť stále splňuje stanovené limity.

Kromě souboru měření typu 2, které jsou uvedeny v předcházející kapitole, je toto měření rozšířeno ještě o měření parametrů chromatické disperze a polarizační vidové disperze. Často se doporučuje provádět kompletní testování vláken před nasazením do provozu, protože později už nemusí být možnost přístupu k vláknům a posoudit tak jejich vhodnost pro budoucí upgrade. [20]

### **9.2.1 Měření útlumu odrazu**

Útlum odrazu je definován jako podíl výkonu vyzářeného k výkonu odraženému. Odražený signál je dán Reyleghovým zpětným rozptylem a je definován jako odraz od optických nehomogenit uvnitř vlákna nebo od optických prvků jako jsou konektory, odbočnice a další. Pro měření útlumu odrazu ORL se využívá několika způsobů. Nejčastěji se využívá OTDR měřící zařízení, které umožňuje měření ORL na konektorech, stejně jako výpočet celkového ORL měřené trasy, ale tato metoda není tak přesná. Dalším způsobem je možnost použít měřící soupravu OLTS pro přímou metodu, které umí určit jen útlum odrazu celé trasy v obou směrech, ale neumí lokalizovat místa s větší odrazivostí. Čím je útlum odrazu vyšší a odrazivost nižší, tím bude síť vykazovat větší bezchybnost a menší ztrátovost. [20]

### 9.2.2 Měření chromatické disperze

Měření chromatické disperze není stejně jako pro měření polarizační vidové disperze vyžadováno v případech, jedná-li se o krátkou trasu (do 40 km) nebo trasa není určena pro vysokorychlostní přenos dat s přenosovou rychlostí vyšší jak 10 Gbit/s. Pomocí měření CD jsme schopni určit o jaký typ optického vlákna se jedná (G.652, G.653, G.655). Chromatická disperze jako nežádoucí jev musí být kompenzována. Abychom mohli určit její přesnou hodnotu, tak můžeme použít výpočet, ale u neznámých tras musíme hodnotu CD měřit. Jen přesně určená hodnota CD může být korektně kompenzována.

Pro měření chromatické disperze existuje celá řada měřících a zkušebních metod, které mohou být použity. Dle doporučení ITU-T G.650 je jako referenční metoda pro měření CD určena metoda fázového posuvu. Dále se používají metody diferenciálního fázového posuvu a metoda zpoždění impulsů v časové oblasti. Všechny tyto metody jsou podrobně popsány včetně jejich blokových schémat v kapitole číslo 5 [Metody pro měření chromatické disperze].

Není nutné, aby toto měření bylo prováděno z obou konců měřené trasy, ale měřit by se mělo v celém spektru vlnových délek nebo v rozsahu vlnových délek (tzv. proměřit spektrální charakteristiku vlákna), u kterých je předpoklad, že budou využívány pro provoz optické sítě. Pro vysokorychlostní systémy DWDM by mělo plně postačovat měření provádět pouze v C-pásmu, popřípadě v C+L-pásmu. Avšak pro systémy CWDM by měla oblast vlnových délek při měření zahrnovat všechna pásma (O, E, S, C a L). [20]

Výpočet celkové chromatické disperze je dán vztahem:

$$CD_{TOTAL} = CD_{KOEf} * L. \quad (9.1)$$

Tab. 2 :Příklad limitů CD [22]

Přenosová rychlost	Délka bitového intervalu [ps]	Limit CD
2.5 Gbit/s (STM 16)	400	16000
10 Gbit/s (STM 64)	100	1600
10 Gbit/s (10 GigE)	100	1000
40 Gbit/s (STM 256)	25	+/- 50

### 9.2.3 Měření polarizační vidové disperze PMD

Toto měření se doporučuje provádět u vláken, kde jejich provozní přenosová rychlost dosahuje rychlosti více jak 10 Gbit/s a jedná se tedy o vysokorychlostní systémy DWDM. V případě nižších přenosových rychlostí nebo krátkých tras není toto měření vyžadováno. Pro měření polarizační vidové disperze se nejčastěji využívají metody GINTY a metoda reflektometrická P-OTDR. Podrobný popis těchto metod včetně blokového zapojení je uveden v kapitole 6 [Metody pro měření polarizační vidové disperze]. Další pokyny pro měření PMD je možno získat v doporučení IEC/TR 61282-9. Jak už bylo uvedeno dříve, metod pro měření je více a každá má odlišné vlastnosti, proto je důležité zvolit si tu nejvhodnější metodu. Metoda GINTY je velice rychlá měřicí metoda, ale musíme mít přístup k oběma koncům měřené trasy, kde je potřeba zapojit zdroj a měřicí přístroj. To může být problém pro trasy v délce stovek km. Na druhou stranu POTDR měří jednosměrně, ale měření je zdlouhavé a metoda je náchylná na pohyb s měřícími šňůrami.

Měření PMD vlastností je plně dostačující provádět z jednoho konce měřené trasy a měřit by se mělo na všech vlnových délkách sloužících pro provoz dané optické sítě. Změřená hodnota polarizační vidové disperze by měla pohybovat okolo 0,2 ps/vkm pro vlnovou délku 1550 nm. Celková PMD je stanovena jako součet všech měřených úseků a je dána vztahem: [20]

$$PMD_{TOTAL} = \sqrt{(PMD)_1^2 + (PMD)_2^2 + (PMD)_3^2 + \dots + (PMD)_N^2} \quad (9.2)$$

Tab. 3: Příklad limitů PMD [23]

Přenosová rychlost	Trvání jednoho bitu	Limit PMD [ps]	Koeficient PMD na 400 km [ps/vkm]
155Mb/s (STM-1)	6,43 ns	640	< 32
622 Mb/s (STM-4)	1,61 ns	160	< 8
2.5 Gb/s (STM-16)	401,88 ps	40	< 2
10 Gb/s (STM-64)	100,47 ps	10	< 0,5
40 Gb/s (STM-256)	25,12 ps	2,5	< 0,125

## 10 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ MĚŘÍCÍCH METOD

Tato část diplomové práce je zaměřena na praktické ověření vybraných měřících metod, pro měření vložného útlumu, útlumu odrazu a disperzních vlivů jako je chromatická a polarizační vidová disperze. Měření se provádělo na Brněnské akademické optické síti univerzit, které se začala budovat už v roce 1993 ve spolupráci s Vysokým učením technickým a Masarykovou univerzitou. Konkrétní měření se provádělo na trase z Fakulty informatiky Masarykovy univerzity (FI MU) do fakulty přírodovědecké (MCI MU). Byl proměřen kabel se 48 vláknů typu G.652 (SM-9 $\mu$ m). Toto měření mělo za cíl provést kontrolu všech klíčových parametrů optické sítě, které mají zásadní vliv na bezchybný provoz a potřebné zajištění kvality provozu pro vysokorychlostní systémy DWDM. Pro měření potřebných parametrů byly použity metody přímé i reflektometrické. Celá tato kapitola bude demonstrovat celé měření na vybraném optickém vlákně označeném bot\_lip049.

Všechny naměřené a vypočítané hodnoty, které byly získány při samotném měření, jsou přehledně zpracovány do tabulek a grafů uvedených v každé části této kapitoly. Pro analýzu a následné zpracování všech měřených hodnot bude použit přístroj od firmy EXFO s názvem FastReporter.

### 10.1 MĚŘENÍ OPTICKÉHO ÚTLUMU

#### 10.1.1 Přímá metoda (OLTS)

##### Lokalita:

- Lokalita A: Brno – Botanická
- Lokalita B: Brno – Lipová

##### Informace o měření a trase:

- Typ vlákna: SM 9  $\mu$ m
- Použité přístroje:

přístroj A: OLTS FOT-932

vlnové délky: 1310/1550/1625 nm

přístroj B: OLTS FOT-932

vlnové délky: 1310/1490/1550 nm

- Testovaná vlákna: bot\_lip049

Tab. 4: Měření vlákna bot\_lip049 metodou OLTS

Vlákno	Vlnová Délka [nm]	Útlum A->B [dB]	Ref. A->B [dB]	Útlum B->A [dB]	Ref. B->A [dB]	Průměr [dB]	ORL A [dB]	ORL B [dB]	Délka [km]
49	1310	2.21	0.00	2.24	1.26	2.22	32.34	28.29	5.759
	1490			1.68	1.13			31.65	
	1550	0.95	0.04	1.15	1.15	1.05	31.78	27.04	
	1625	1.11	0.01				33.30		

Výpočet limitní hodnoty útlumu měřené trasy pro 1310 nm:

Dle doporučení ITU-T jsou definovány hodnoty útlumu konektorů ( $A_K=0,4$  dB), svárů ( $A_S=0,05$  dB) a jednovidového vlákna ( $A_V=0,35$  dB/km). Na základě znalosti těchto referenčních hodnot a délky měřené trasy jsme schopni ze vztahu (10.1) určit limitní hodnotu útlumu pro měřenou optickou trasu. Parametry  $n_k$  a  $n_s$  udávají počet daných prvků (konektorů, svárů).

$$A = (L \cdot A_V) + (n_k \cdot A_K) + (n_s \cdot A_S) . \quad (10.1)$$

$$A = (5,759 \cdot 0,35) + (2 \cdot 0,4) + (3 \cdot 0,05) = 2,996 \text{ dB/km}$$

#### Shrnutí:

Přímá metoda je uvedena jako referenční, která umožňuje velmi rychlé a přesné určení hodnoty vložného útlumu. V případě použití měřidla OLTS jsme pak dále schopni určit délku vlákna i útlumu odrazu. Při samotném měření optické trasy je velmi důležité kontrolovat, zda nebyla překročena limitní hodnota útlumu optické trasy. Tato limitní hodnota je určena délkou optické trasy, počtem optických spojů a samozřejmě i počtem použitých konektorů. Pro tuto konkrétní trasu je vypočítána hodnota limitního útlumu na 2,966 dB. V případě, že by tato hodnota při měření určitého vlákna přesáhla tuto limitní hodnotu, by mohlo dojít ke ztrátě signálu a tudíž i ke ztrátě přenášených informací. Přímou metodou s měřidlem OLTS jsme schopni měřit kromě útlumu a délky optické trasy i útlum odrazu na konektorech. Hodnota ORL by měla být co nejvyšší. Pokud by útlum odrazu byl příliš malý, znamenalo by to, že konektory jsou poškozeny nebo zašpiněny, a je třeba je vyčistit, popřípadě vyměnit.

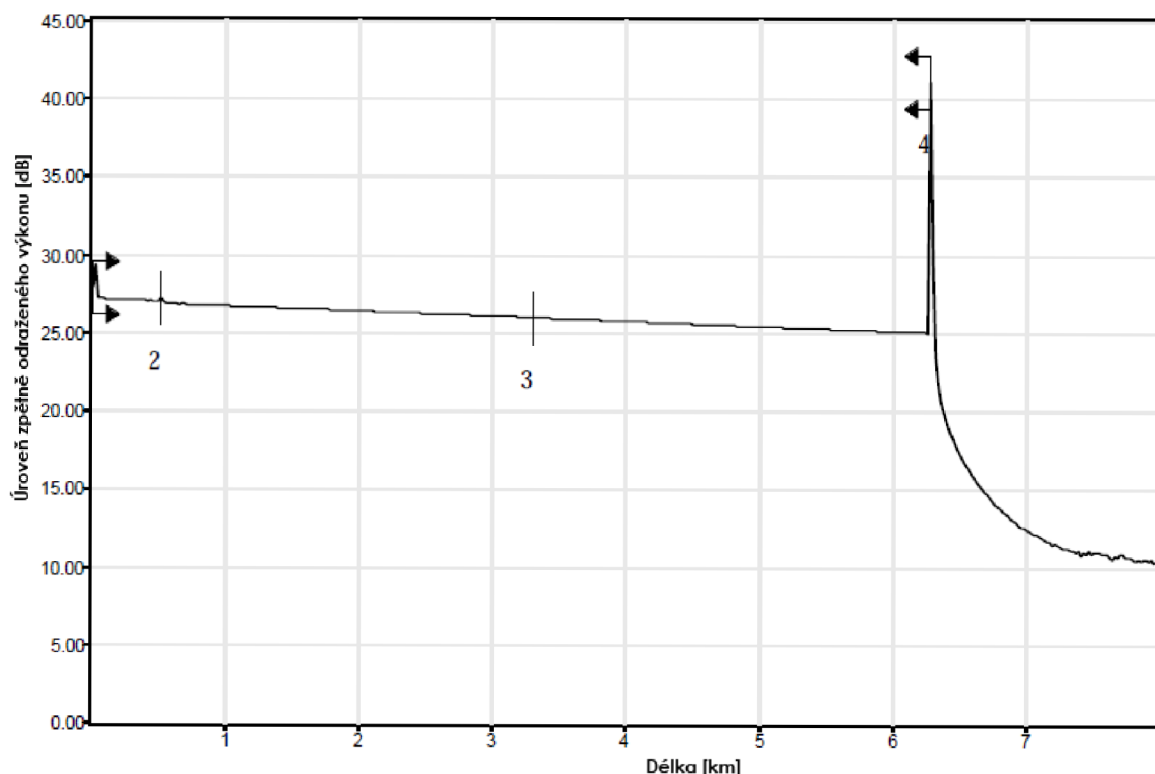
## 10.1.2 Metoda OTDR

### Lokalita:

- Lokalita A: Brno – Botanická
- Lokalita B: Brno – Lipová

### Informace o měření a trase:

- Typ vlákna: SM 9  $\mu\text{m}$
- Použitý přístroj: EXFO FTB-7400E-2347B-EA-VFL
- Vlnová délka: 1310/1383/1550/1625 nm
- Předřadné vlákno: 0,5132 km
- Šířka pulsu: 100 ns
- Doba průměrování: 15 s
- Testovaná vlákna: bot\_lip049



Obr. 29: Náměr vlákna bot\_lip049 metodou OTDR pro 1310 nm

Na obrázku (Obr. 29) je zobrazen náměr vycházející z OTDR měřiče, na kterém je patrné zobrazení připojení předřadného vlákna k optickému vláknu trasy (událost 2). Uprostřed náměru je znázorněn optický svár (událost 3) a konec měřené trasy je

znázorněn jako událost 4. Zde se pak měří hodnota ORL. Velký pokles křivky za koncem trasy znázorňuje rozptyl světla do okolí.

Tab. 5: Naměřené hodnoty metodou OTDR pro vlákno bot\_lip049

Vlákno	Vlnová délka [nm]	Útlum trasy [dB]	Koeficient útlumu vlákna [dB/km]	Průměrný útlum sváru [dB]	ORL trasy [dB]	Délka trasy [km]
bot_lip049	1310	2,196	0,350	0,039	<19,41	6,2676
	1383	1,887	0,301	0,127	18,91	6,2673
	1550	1,472	0,235	---	<17,88	6,2667
	1625	1,589	0,254	---	<19,34	6,2670

#### Shrnutí:

Přístroj OTDR měří metodou reflektometrickou, jejíž výhodou oproti metodě přímé je její možnost přímo lokalizovat vznik poruchy na měřené trase a možnost měření z jednoho konce dané trasy. Její nevýhodou je však poměrně vyšší pořizovací cena zařízení a také poněkud delší doba měření.

Měření se provádělo pouze v jednom směru a to z Botanické ulice na Lipovou. Při měření metodou OTDR bylo zapotřebí před měřenou optickou trasu připojit ještě 500 m předřadného vlákna, které slouží pro eliminaci mrtvé zóny při měření. Díky tomuto jsme schopni přesně určit počátek měřené trasy a následně přesně určit místo vzniku případné chyby. Stejně jako u metody přímé je potřeba dodržovat vypočítanou limitní hodnoty útlumu.



## 10.2 MĚŘENÍ CHROMATICKÉ DISPERZE

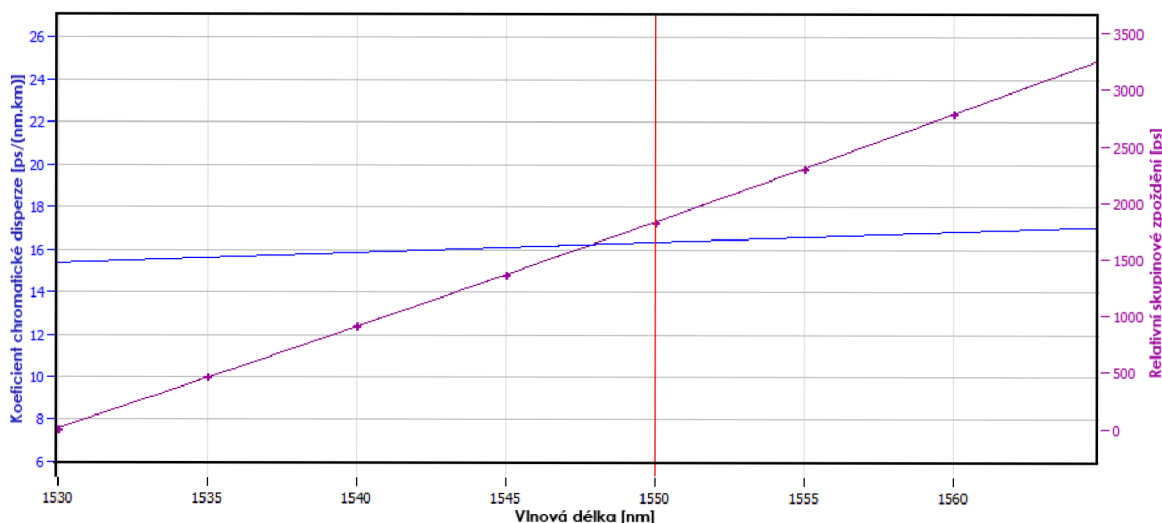
### 10.2.1 Metoda fázového posuvu

#### Lokalita:

- Lokalita A: Brno – Botanická
- Lokalita B: Brno – Lipová

#### Informace o měření:

- Typ vlákna: SM 9  $\mu\text{m}$
- Použitý přístroj: EXFO FTB-400 s modulem FTB-5800
- Zdroj: EXFO FLS-5834A
- Vlnová délka: 1530 - 1560 nm
- Krok měření: 5 nm
- Doba průměrování: cca 30 s
- Testovaná vlákna: bot\_lip049



Obr. 30: Závislost koeficientu chromatické disperze  $D$  [ps/(nm.km)] a relativního skupinového zpoždění RGD [ps] na vlnové délce  $\lambda$  [nm] pro vlákno bot\_lip049

Na obrázku (Obr. 30) je uvedena závislost koeficientu chromatické disperze  $D$  na vlnové délce  $\lambda$  [nm] (modrá křivka) a pro větší přehlednost je zde zobrazena i závislost relativního skupinového zpoždění na vlnové délce  $\lambda$  [nm] (fialová křivka). Pro vlnovou délku 1550 nm (červený kurzor) byla změřena hodnota koeficientu chromatické disperze 16,35 [ps/(nm.km)] a hodnota relativního zpoždění byla naměřena 1830,35 [ps].

Tab. 6: Naměřené a vypočítané hodnoty při měření CD metodou fázového posuvu pro vlákno bot\_lip049

Změřené hodnoty					
Vlákno	Vlnová délka [nm]	RGD [ps]	D [ps/nm]	Koeficient D [ps/nm.km]	Délka [km]
<b>049</b>	1530	0,00	88,27	15,37	5,743
	1535	455,23	89,68	15,62	
	1540	911,51	91,09	15,86	
	1545	1361,41	92,49	16,11	
	1550	1830,35	93,88	16,35	
	1555	2304,77	95,25	16,59	
	1560	2780,76	96,62	16,82	

#### Shrnutí:

Při měření chromatické disperze optických vláken se měří koeficient chromatické disperze  $D$  [ps/(nm.km)], který lze vyjádřit několika způsoby jako relativní skupinové zpoždění RGD [ps] a disperze  $D$  [ps/nm]. Tato metoda se používá jako metoda referenční z důvodu její přesnosti. Velkou výhodou je, že si můžeme přesně určit spektrální oblast, kterou chceme proměřit. V našem případě jsme si určili oblast okolo vlnové délky 1550 nm s rozestupem vlnových délek po 5 nm (konkrétní měřená oblast 1530 – 1560 nm). Důvodem volby této oblasti bylo plánované nasazení vysokorychlostních systémů na této optické trase. Další velkou výhodou je rychlost sběru dat při měření, která se pohybuje kolem 30 s. Jediné omezení je v tom, že touto metodou není možné měřit z jednoho konce měřené optické trasy, protože používáme dvě zařízení, a to zdroj signálu a měřící zařízení. Naměřené hodnoty se po změření zpracovávali pomocí programu FastReporter.

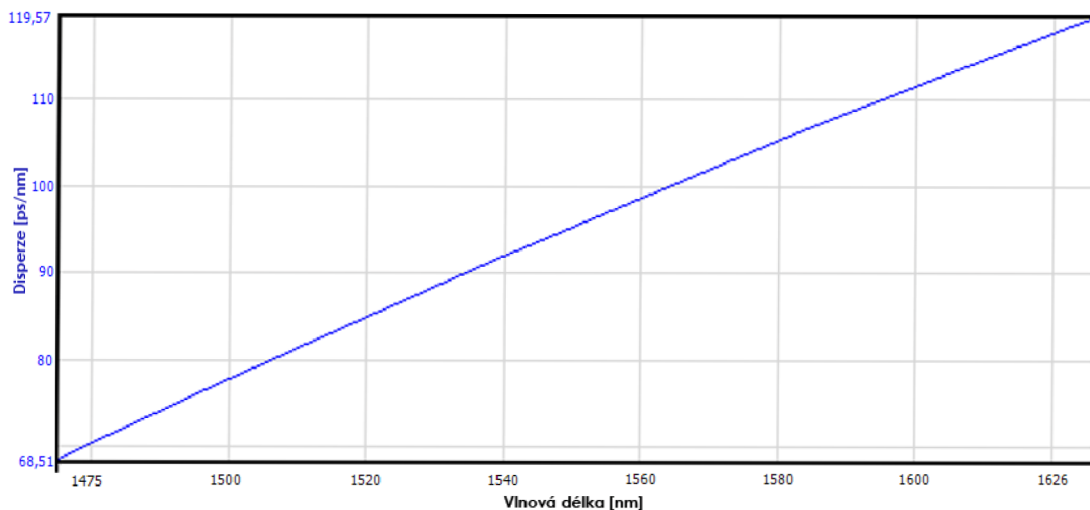
## 10.2.2 Metoda reflektometrické

### Lokalita:

- Lokalita A: Brno – Botanická
- Lokalita B: Brno – Lipová

### Informace o měření:

- Typ vlákna: SM 9  $\mu\text{m}$
- Použitý přístroj: EXFO FTB-200 s modulem FTB-5700
- Vlnová délka: 1475 - 1625 nm
- Doba průměrování: cca 3 min
- Testovaná vlákna: bot\_lip049



Obr. 31: Závislost disperze  $D$  [ps/nm] na vlnové délce  $\lambda$  [nm] pro vlákno bot\_lip049

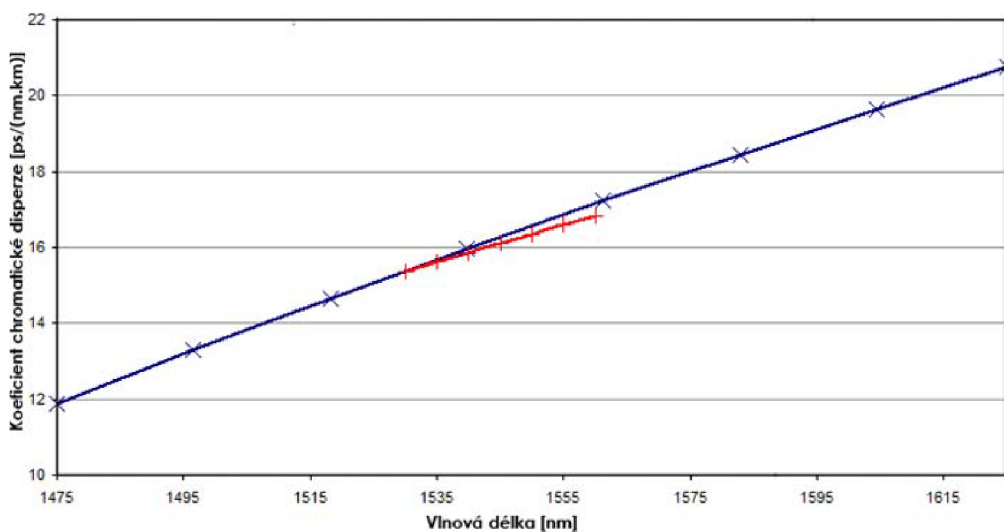
Na obrázku (Obr. 31) je zobrazena závislost disperze  $D$  [ps/nm] na vlnové délce  $\lambda$  [nm]. Z tohoto grafu se dá jednoduše vypočítat koeficient chromatické disperze  $D$  [ps/(nm.km)] a to tak, že vezmeme hodnotu disperze  $D$  [ps/nm] a podělíme jí délkou trasy  $L$  [km]. Pro vlnovou délku  $\lambda$  [nm] 1550 nm je koeficient chromatické disperze  $D=16,49$  [ps/(nm.km)].

Tab. 7: Naměřené a vypočítané hodnoty při měření CD metodou reflektometrickou OTDR pro vlákno bot\_lip049

Změřené hodnoty				Vypočítané hodnoty
Vlákno	Vlnová délka [nm]	D [ps/nm]	Délka [km]	Koeficient D [ps/nm.km]
049	1475,00	68,51	5,760	11,89
	1496,57	76,60		13,30
	1518,14	84,39		14,65
	1539,71	91,90		15,96
	1561,29	99,17		17,22
	1582,86	106,19		18,44
	1604,43	112,98		19,62
	1625,00	119,57		20,76

### Shrnutí:

Reflektometrická metoda se v tomto případě používala pouze jako kontrolní metoda pro metodu fázového posuvu. Zaměřili jsme se na měření parametrů disperze D [ps/nm] a ze znalosti délky trasy L [km] jsme následně dopočítali hodnotu koeficientu chromatické disperze D [ps/(nm.km)]. Měření se provádělo na širším spektru vlnových délek (konkrétně 1475 – 1625 nm). Tato metoda je méně přesná než metoda fázového posuvu, avšak na druhou stranu poskytuje dostatečný přehled o celém spektru vlnových délek. Je také mnohem pomalejší než předchozí metoda, doba sběru dat této metody trvá okolo 3 minut. Velkou předností této metody je možnost měření z jednoho konce měřené optické trasy. Data se opět zpracovávala pomocí programu FastReporter.



Obr. 32: Porovnání obou měřících metod pro měření CD disperze

Na obrázku (Obr. 32) je vidět porovnání mezi oběma metodami pro měření chromatické disperze CD. Modrá křivka zastupuje reflektometrickou metodu, pomocí které jsme byli schopni proměřit celé pásmo (1475 – 1625 nm). Červená křivka na druhou stranu zastupuje metodu fázového posuvu, u které jsme přesně stanovili oblast, která se má proměřit (konkrétně oblast C+L pásma v rozmezí 1530 – 1560 nm).

## 10.3 MĚŘENÍ POLARIZAČNÍ VIDOVÉ DISPERZE

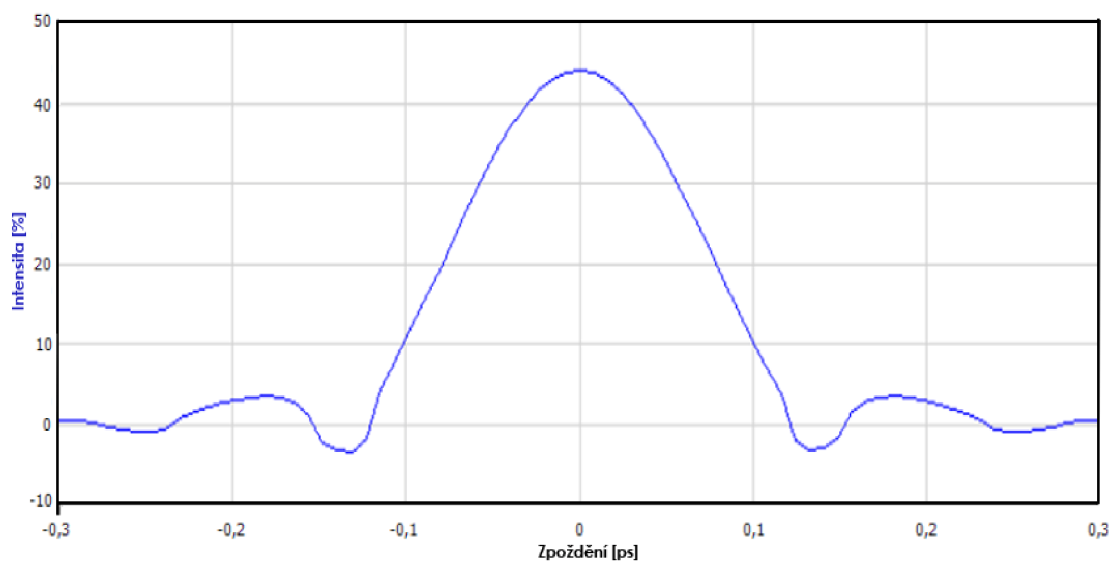
### 10.3.1 Metoda GINTY

#### Lokalita:

- Lokalita A: Brno – Botanická
- Lokalita B: Brno – Lipová

#### Informace o měření:

- Typ vlákna: SM 9  $\mu\text{m}$
- Použitý přístroj: FTB-400 s modulem FTB-5500B
- Zdroj: FLS-5834 se širokospektrální LED diodou
- Vlnová délka: 1527,42 – 1629,64 nm
- Doba průměrování: 15 s
- Testovaná vlákna: bot\_lip049



Obr. 33: Gaussovo rozložení skupinového zpoždění pro vlákno bot\_lip049

Na obrázku (Obr. 33) je zobrazeno Gaussovo rozložení skupinového zpoždění při měření PMD metodou interferometrickou. Abychom byli schopni určit velikost PMD, musíme znát její zpoždění  $\Delta t$  [ps] a délku vlákna  $L$  [km]. Pokud tyto hodnoty známe, jsme schopni ze vztahu pro výpočet PMD určit její hodnotu.

$$PMD = \frac{\Delta t}{\sqrt{L}} . \quad (10.2)$$

Tab. 8: Naměřené hodnoty PMD metodou GINTY pro vlákno 049

<b>PMD Delay</b>	<b>[ps]</b>	0.0240
<b>PMD Coefficient</b>	<b>[ps/√km]</b>	<b>0.0100</b>
<b>PMD Delay, 2nd order</b>	<b>[ps/nm]</b>	0.0003
<b>Fibre Length</b>	<b>[km]</b>	5,743

#### Shrnutí:

Měření polarizační vidové disperze se provádělo měřicí metodou GINTY. Touto měřicí metodou jsme změřili hodnotu PMD zpoždění, které bylo rovno hodnotě 0,024 ps. Délku vlákna jsme museli změřit pomocí OLTS, protože bylo potřeba ji zadat do přístroje pro měření. Délku vlákna jsme naměřili 5,743 km. Na základě těchto hodnot a znalosti předchozího vztahu pro výpočet PMD (10.2) jsme vypočítali hodnotu  $PMD = 0,0100$  ps/√km. Celková doba sběru dat se pohybovala okolo 15 s, z čehož vyplývá, že se jedná o poměrně rychlou měřicí metodu. Její hlavní nevýhodou je však fakt, že je měření nutné provádět z obou konců měřené optické trasy. Na jednom konci trasy je použit přijímač a na druhém zdroj signálu se širokospektrální LED diodou s polarizovaným výstupem.

### 10.3.2 Metoda P-OTDR

#### Lokalita:

- Lokalita A: Brno – Botanická
- Lokalita B: Brno – Lipová

#### Informace o měření:

- Typ vlákna: SM 9  $\mu\text{m}$
- Použitý přístroj: FTB-200 s modulem FTB-5700
- Vlnová délka: 1478 - 1624 nm
- Doba průměrování: cca 3 min
- Testovaná vlákna: bot\_lip049

Tab. 9: Naměřené hodnoty PMD metodou P-OTDR pro vlákno bot\_lip049

PMD Delay	[ps]	0.07
PMD Coefficient	[ps/vkm]	0.0274
PMD Delay, 2nd order	[ps/nm]	0.0020
Fibre Length	[km]	5,760

#### Shrnutí:

Metoda P-OTDR (Polarization OTDR) v našem případě sloužila pro kontrolu předchozího měření metodou GINTY. Jak je patrné z tabulky (Tab. 9), hodnoty jsou oproti metodě GINTY vyšší. Tato drobná odchylka mohla být způsobena pohybem měřící šňůry při měření nebo tím že, že jsme měřili na krátké trase a tudíž byla hodnota PMD dosti nízká. Pro větší hodnoty PMD by byla přesnější. Velkou výhodou, kterou nám tato metoda nabízí, je možnost měřit z jednoho konce měřené trasy. Jakýkoliv pohyb s měřící šňůrou při měření nám však automaticky prodlužuje dobu směru dat, protože přístroj detekuje chybu a musí měření opakovat. Jelikož se jedná o reflektometrickou metodu, jsme schopni na základě měření určit i místo, ve kterém se vyskytuje vyšší PMD a tyto úseky následně vyměnit.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo prostudovat metody pro měření klíčových parametrů optických sítí a vytvořit metodickou příručku pro měření v praxi. Následně tyto měřicí metody ověřit na konkrétní optické síti a vzájemně je porovnat. Měření se provádělo na Brněnské akademické počítačové síti. Na této optické síti se testovalo jaký optický útlum, chromatickou a polarizační vidovou disperzi mají použítá vlákna a zda je možnost na této stávající síti provozovat vysokorychlostní systém DWDM o přenosové rychlosti 40Gbit/s.

Pro měření optického útlumu je stanovena přímá metoda jako referenční. Umožňuje rychlý přehled o optickém útlumu. Při měření jsme používali měřidlo OLTS, které nám usnadnilo práci díky tomu, že v jednom zařízení je integrovaný jak zdroj, tak měřidlo optického výkonu, a tudíž odpadá nutnost přepojování měřících zařízení z jednoho konce na druhý. Měření se provádělo pro vlnové délky 1310/1490/1550/1625 nm. Dále se pro měření využívá metoda reflektometrická. Ta používá jako měřicí zařízení měřič OTDR jehož velkou předností je možnost měření z jednoho místa a zároveň možnost lokalizovat místo se zvýšenou hodnotou útlumu. Měření se provádělo pro všechny vlnové délky 1310/1383/1550/1625 nm. Měření útlumu se provádí vždy, ať už jde o vysokorychlostní systémy nebo nikoliv. Při samotném měření jsme zjistili, že průměrná hodnota útlumu trasy se pohybovala okolo 2,22 dB/km. Limitní hodnotu útlumu trasy jsme stanovili na 2,996 dB/km. Na základě těchto znalostí jsme schopni stanovit, že optická trasa splňuje útlumové podmínky.

Jak už bylo řečeno dříve, měření se provádělo hlavně z důvodu plánovaného nasazení DWDM systémů. V případě vysokorychlostních přenosových systémů nad 10 Gbit/s je velmi důležité zaměřit se na měření disperzních vlivů jako CD a PMD, které mají nežádoucí vliv na kvalitu přenášené informace. Pro měření chromatické disperze CD se jako referenční metoda používá metoda interferometrická – metoda fázového posuvu. Touto metodou jsme zjistili, že koeficient chromatické disperze D je pro vlnovou délku 1550 nm 16,35 [ps/nm.km]. Jako kontrolní metodu jsme použily metodu reflektometrickou. Hodnota koeficientu chromatické disperze D nám vyšla 16,49 [ps/nm.km]. Polarizační vidové disperze se měřilo metodou GINTY, která je opět stanovena jako referenční. Koeficient PMD jsme změřili 0,0100 [ps/vkm] a poté byl koeficient PMD změřen metodou reflektometrickou P-OTDR. Na základě těchto



změřených hodnot a znalosti limitních hodnot PMD (viz Tab. 3) jsme schopni určit, že měřené optické síti je možné provozovat vysokorychlostní systémy DWDM s přenosovou rychlostí 40 Gbit/s. Při měření jsme se také zaměřili na kontrolu ORL. Změřené hodnoty byly většinou nízké. To bylo způsobeno použitým typem konektorů SC/PC. Pro zvýšení ORL bych doporučil nahrazení konektory se šikmým broušením čel (SC/APC, E2000/APC).

Hlavní částí této práce bylo vytvoření metodické příručky pro závěrečná měření optických parametrů. Tato příručka slouží jako ucelený přehled souboru měření, která by se měla obecně dodržovat při závěrečných měřeních na optických trasách. Důvodem vytvoření byl fakt, že dosud nejsou žádné přesně stanové normy, podle kterých by se mělo měření provádět, existují pouze doporučení dle ITU-T. Tato příručka je rozdělena do dvou částí. První část nazvaná jako soubor testů 1 uvádí jak postupovat při údržbě a měření útlumu optických sítí. Jsou zde uvedeny potřebné pomůcky pro čištění a kontrolu čel konektorů a jsou zde uvedeny i postupy pro měření optického útlumu. Soubor testů 1 se provádí vždy při jakémkoliv měření optických tras. V případě, že se jedná o vysokorychlostní systémy DWDM je nutno přistoupit k souboru testů 2, což je druhá část metodické příručky. Tato část je oproti té předchozí rozšířena o měření disperzních vlivů jako je chromatická disperze a polarizační vidová disperze, které nám mohou ovlivnit signál přenášený optickým vláknem.

## SEZNAM LITERATURY

- [1] FILKA, M. Přenosová media. Skripta. VUT FEKT, Brno 2003
- [2] FILKA, M. Optické sítě. Skripta. VUT FEKT, Brno 2007
- [3] MARŠÁLEK, L. Optická vlákna. Skripta. FEI KEST, Ostrava 2006, [online], [cit. 2009-19-10]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>>
- [4] Boháč, L.: Přenášky z Optických komunikací. ČVUT, Fakulta elektrotechniky
- [6] HÁJEK, M., KUCHARSKI, M.: Vliv ohybů na útlum jednojáderného optického vlákna. [online], [cit. 2009-26-10]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/vlnova-delka1625.pdf>>
- [7] VÝUKOVÝ MATERIÁL: Pasivní optické přístupové sítě PON. [online], [cit. 2009-3-11]. Dostupný z WWW:  
<[www.comtel.cz/files/download.php?id=4547](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4547)>
- [8] SCHLITTER, P.: Optické přístupové sítě. ČVUT FEL, Praha 2004 [online], [cit. 2009-3-11]. Dostupné z WWW:  
<<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072807>>
- [9] PUŽMANOVÁ, R.: Pasivní optická síť. 2004, [online], [cit. 2009-5-11]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.lupa.cz/clanky/pasivni-opticka-sit>>
- [10] TÝM MIKROKOM: Co se měří na optických kabelech. [online], [cit. 2009-5-11]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/co-se-meri.pdf>>
- [11] HÁJEK, M.: Jak ovlivňují parametry měřících přístrojů přesnost měření optických tras. [online], [cit. 2009-5-11]. Dostupné z WWW:  
<[http://www.mikrokom.eu/sk/pdf/parametry\\_mereni.pdf](http://www.mikrokom.eu/sk/pdf/parametry_mereni.pdf)>

- [12] BROUČEK, J., KOSOUR, P., REICHERT, P.: Optický reflektometr nebo přímá metoda? [online], [cit. 2009-9-11]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.profiber.cz/eshop/files/Opticky\\_reflektometr\\_nebo\\_prima\\_metoda\\_Klasicke\\_mereni\\_trochu\\_netradicne.pdf](http://www.profiber.cz/eshop/files/Opticky_reflektometr_nebo_prima_metoda_Klasicke_mereni_trochu_netradicne.pdf)>
- [13] TELECOM: Výstavba přístupových sítí, optické kabely, TPP 2002,  
[cit. 2009-23-11]
- [14] BROUČEK, J., KOSOUR, P.: Realita měření GPON a EPON, Praha 2007, [online],  
[cit. 2009-24-11]. Dostupné z WWW:  
<[http://www.profiber.cz/eshop/files/Realita%20mereni\\_siti%20EPON\\_GPON](http://www.profiber.cz/eshop/files/Realita%20mereni_siti%20EPON_GPON)>
- [15] Firemní dokumentace EXFO, How to choose an optical loss test set, 2004,  
[online], [cit. 2009-28-11]. Dostupné z WWW:  
<<http://documents.EXFO.com/appnotes/anote021-ang.pdf>>
- [16] HÁJEK, M., HOLOMEČEK, P.: Chromatická disperze jednovidových vláken a jejich měření [online], [cit. 2009-1-12]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/chrom-disperze.pdf>>
- [17] HÁJEK, M., HOLOMEČEK, P.: Měření PMD optických tras ve sborníku *Optické komunikace 2004*. Praha, 2004, s. 53 – 60, [cit. 2009-5-12]
- [18] BLAŽEK, V., ŠVITORKA, Z.: Monitorovací systémy jako součást moderních přenosových sítí ve sborníku *Optické komunikace 2006*. Praha, 2006, s. 1 – 10,  
[cit. 2009-6-12]
- [19] EXFO, FTTx PON Guide: Testing Passive optical Network. Canada: Quebec City, 2004. ISBN 1-55342-002-0, [cit. 2009-10-12]
- [20] Recommendation ITU-T G.650.3 (2008), Test methods for installed single-mode optical fibre cable links., [cit. 2010-5-3]

- [21] BROUČEK, J.,: Měření, čištění a údržba optických sítí, [online], [cit. 2010-18-3],  
Dostupné z WWW:  
<[http://www.klfree.net/stores/cisteni\\_udrzba\\_a\\_servisni\\_pomucky\\_pro\\_opticke\\_site.pdf](http://www.klfree.net/stores/cisteni_udrzba_a_servisni_pomucky_pro_opticke_site.pdf)>
- [22] BROUČEK, J., Blažek, V.,: Audit tras pro DWDM, CWDM, [online],  
[cit. 2010-14-4], Dostupné z WWW:  
<[http://www.profiber.cz/eshop/files/D4\\_Blazek\\_Broucek-audit\\_tras\\_pro\\_DWDM\\_CWDM.pdf](http://www.profiber.cz/eshop/files/D4_Blazek_Broucek-audit_tras_pro_DWDM_CWDM.pdf)>
- [23] KYSELÁK, M. Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 110 s. ISBN:978-80-214-3827-9. Vedoucí doktorské práce doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.

# SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Seznam veličin a symbolů

$\beta$	.....	hodnota dvojlomu ve vlákne
$\pi$	.....	Rudolfovo číslo $\pi=3,1416$
$\phi$	.....	mezní úhel
$\lambda$	.....	vlnová délka
$\Delta t$	.....	zpoždění
$A_k$	.....	útlum konektoru
$A_s$	.....	útlum sváru
$A_v$	.....	útlum vlákna
$c$	.....	rychlost světla ve vakuu
$h$	.....	vazební délka vlákna
$L$	.....	délka celé kabelové trasy
$NA$	.....	numerická apertura vlákna
$n$	.....	index lomu
$n_1$	.....	index lomu jádra
$n_2$	.....	index lomu pláště

## Seznam zkratk

<b>AON</b>	<b>Active Optical Network</b>
<b>APC</b>	<b>Angle Point Contact</b>
<b>APD</b>	<b>Avalanche Photo Diode</b>
<b>APON</b>	<b>Active Passive Optical Network</b>
<b>ATM</b>	<b>Asynchronous Transfer Module</b>
<b>BPON</b>	<b>Broadband Passive Optical Network</b>
<b>CATV</b>	<b>Cable TV</b>
<b>CD</b>	<b>Chromatic Dispersion</b>
<b>CWDM</b>	<b>Coarse Wavelength Division Multiplexing</b>
<b>DSF</b>	<b>Dispersion Shifted Fiber</b>
<b>DT</b>	<b>Drop Terminal</b>
<b>DWDM</b>	<b>Dense Wavelength Division Multiplexing</b>

<b>EDFA</b>	<b>Erbium Doped Fiber Amplifier</b>
<b>EFM</b>	<b>Ethernet in the First Mile</b>
<b>EPON</b>	<b>Ethernet Passive Optical Network</b>
<b>FDM</b>	<b>Frequency Division Multiplexing</b>
<b>FTTB</b>	<b>Fiber to the Building</b>
<b>FTTC</b>	<b>Fiber to the Curb</b>
<b>FTTCab</b>	<b>Fiber to the Cabinet</b>
<b>FTTEx</b>	<b>Fiber to the Exchange</b>
<b>FTTH</b>	<b>Fiber to the Home</b>
<b>FTTN</b>	<b>Fiber to the Node</b>
<b>FTTO</b>	<b>Fiber to the Office</b>
<b>GEM</b>	<b>GPON Encapsulation Method</b>
<b>GINTY</b>	<b>Genreal Analysis INTY</b>
<b>GPON</b>	<b>Gigabit Passive Optical Network</b>
<b>IEC</b>	<b>International Electrotechnical Commission</b>
<b>IEEE</b>	<b>Institute of Electrical and Electronics Engineers</b>
<b>IPTV</b>	<b>Internet Protocol TV</b>
<b>ISO/OSI</b>	<b>International Standards Organization / Open System Interconnection</b>
<b>ITU-T</b>	<b>International Telecommunication Unit – Telecommunications Standardization Sector</b>
<b>LASER</b>	<b>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</b>
<b>LED</b>	<b>Light Emitting Diode</b>
<b>MM</b>	<b>Multi Mode</b>
<b>NA</b>	<b>Numerical Aperture</b>
<b>NZ-DSF</b>	<b>Non Zero Dispersion Shifted Fiber</b>
<b>OAN</b>	<b>Optical Access Network</b>
<b>ODN</b>	<b>Optical Distribution Network</b>
<b>OIL</b>	<b>Optical Insertion Loss</b>
<b>OLT</b>	<b>Optical Line Termination</b>
<b>OLTS</b>	<b>Optical Loss Test Set</b>
<b>ONT</b>	<b>Optical Network Terminal</b>
<b>ONU</b>	<b>Optical Network Unit</b>

<b>OPM</b>	<b>O</b> ptical <b>P</b> ower <b>M</b> eter
<b>ORL</b>	<b>O</b> ptical <b>R</b> eturn <b>L</b> oss
<b>OTDR</b>	<b>O</b> ptical <b>T</b> ime <b>D</b> omain <b>R</b> eflectometer
<b>P2MP</b>	<b>P</b> oint to <b>M</b> ulti <b>P</b> oint
<b>P2P</b>	<b>P</b> oint to <b>P</b> oint
<b>PBS</b>	<b>P</b> olarized <b>B</b> eam <b>S</b> plitter
<b>PMD</b>	<b>P</b> olarisation <b>M</b> ode <b>D</b> ispersion
<b>POF</b>	<b>P</b> lastic <b>O</b> ptical <b>F</b> iber
<b>PON</b>	<b>P</b> assive <b>O</b> ptical <b>N</b> etwork
<b>P-OTDR</b>	<b>P</b> olarimetric <b>O</b> ptical <b>T</b> ime <b>D</b> omain <b>R</b> eflectometry
<b>SM</b>	<b>S</b> ingle <b>M</b> ode
<b>STM</b>	<b>S</b> ynchronous <b>T</b> ransport <b>M</b> odule
<b>TDM</b>	<b>T</b> ime <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing
<b>TINTY</b>	<b>T</b> raditional <b>A</b> nalysis <b>I</b> NTY
<b>TMN</b>	<b>T</b> elecommunications <b>M</b> anagement <b>N</b> etwork
<b>USF</b>	<b>U</b> ns- <b>S</b> hifted <b>F</b> iber
<b>VOD</b>	<b>V</b> ideo <b>o</b> n <b>D</b> emand
<b>VOIP</b>	<b>V</b> oice <b>o</b> ver <b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol
<b>WDM</b>	<b>W</b> avelength <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing
<b>xDSL</b>	<b>G</b> eneral <b>D</b> igital <b>S</b> ubscriber <b>L</b> ine

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Odrazy světelného paprsku ve vlákne .....12	12
Obr. 2: Struktura optického vlákna .....13	13
Obr. 3: Šíření optického paprsku v různých typech optických vláken .....14	14
Obr. 4: Spektrální šířka pásma pro LED a LASER diody .....17	17
Obr. 5: Typy konektorů .....19	19
Obr. 6: Rozdělení přenosových pásem pro jednovidová vlákna .....22	22
Obr. 7: Chromatická disperze vláken G.652, G.653, G.655.....25	25
Obr. 8: Základní rozdělení optických sítí .....27	27
Obr. 9: Schéma přístupové sekce OAN .....28	28
Obr. 10: Schéma měřicí soupravy pro přímou metodu .....32	32
Obr. 11: Schéma měřicí varianty A1 .....33	33
Obr. 12: Schéma měřicí varianty A2 .....33	33
Obr. 13: Schéma měřicí varianty A3 .....34	34
Obr. 14: Sestava měřicí soupravy pro metodu OTDR.....35	35
Obr. 15: Rozdíl mezi dynamickým a efektivním rozsahem.....36	36
Obr. 16: Vliv délky měřicího impulsu na měření.....38	38
Obr. 17: Měřicí souprava pro metodu fázového posuvu .....39	39
Obr. 18: Měřicí souprava pro metodu interferometrickou .....40	40
Obr. 19: Měřicí souprava pro zpoždění impulsů v časové oblasti .....41	41
Obr. 20: Měřicí souprava pro metodu TINTY .....43	43
Obr. 21: Složení jednotlivých složek PMD interferogramu .....43	43
Obr. 22: Měřicí souprava pro metodu GINTY .....44	44
Obr. 23: Interferogram metody GINTY .....45	45
Obr. 24: Příklad útlumové charakteristiky získaná OTDR ve směru od ONT k OLT [19] .....48	48



<b>Obr. 25: Princip metody ARFTS .....</b>	<b>51</b>
<b>Obr. 26: Inspekční mikroskop pro kontrolu kvality a čistoty čel optických konektorů .....</b>	<b>53</b>
<b>Obr. 27: Čela optických konektorů pod mikroskopem.....</b>	<b>54</b>
<b>Obr. 28: Pomůcky pro čištění čel konektorů.....</b>	<b>54</b>
<b>Obr. 29: Náměr vlákna bot_lip049 metodou OTDR pro 1310 nm .....</b>	<b>63</b>
<b>Obr. 30: Závislost koeficientu chromatické disperze <math>D</math> [ps/(nm.km)] a relativního skupinového zpoždění RGD [ps] na vlnové délce <math>\lambda</math> [nm] pro vlákno bot_lip049 .....</b>	<b>65</b>
<b>Obr. 31: Závislost disperze <math>D</math> [ps/nm] na vlnové délce <math>\lambda</math> [nm] pro vlákno bot_lip049.....</b>	<b>67</b>
<b>Obr. 32: Porovnání obou měřících metod pro měření CD disperze.....</b>	<b>68</b>
<b>Obr. 33: Gaussovo rozložení skupinového zpoždění pro vlákno bot_lip049 .....</b>	<b>69</b>

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Porovnání závislosti délky předřadného vlákna, dynamického rozsahu a délky mrtvé zóny na délce měřícího impulsu. [14] .....	38
Tab. 2 :Příklad limitů CD [22] .....	59
Tab. 3: Příklad limitů PMD [23] .....	60
Tab. 4: Měření vlákna bot_lip049 metodou OLTS.....	62
Tab. 5: Naměřené hodnoty metodou OTDR pro vlákno bot_lip049.....	64
Tab. 6: Naměřené a vypočítané hodnoty při měření CD metodou fázového posuvu pro vlákno bot_lip049.....	66
Tab. 7: Naměřené a vypočítané hodnoty při měření CD metodou reflektometrickou OTDR pro vlákno bot_lip049 .....	68
Tab. 8: Naměřené hodnoty PMD metodou GINTY pro vlákno 049.....	70
Tab. 9: Naměřené hodnoty PMD metodou P-OTDR pro vlákno bot_lip049 .....	71