

# 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

REPRODUKOVATELNOST A PŘESNOST MĚŘENÍ POLARIZAČNÍ  
VIDOVÉ DISPERZE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. FILIP KOVÁČ

BRNO 2015



**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

# REPRODUKOVATELNOST A PŘESNOST MĚŘENÍ POLARIZAČNÍ VIDOVÉ DISPERZE

REPRODUCIBILITY AND ACCURACY OF POLARIZATION MODE DISPERSION  
MEASUREMENTS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. FILIP KOVÁČ**

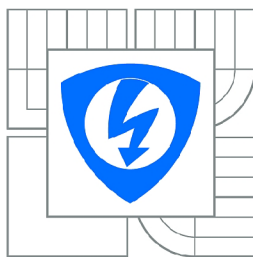
**VEDOUČÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. RADIM ŠIFTA**

BRNO 2015





VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. Filip Kováč

**ID:** 136547

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Reprodukovatelnost a přesnost měření polarizační vidové disperze**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je teoretický rozbor chromatické a polarizační vidové disperze, jejich matematicky popis, popis měřících metod a způsoby možných kompenzací. Student se v praktické části zaměří na polarizační vidovou disperzi. Provede důkladné porovnávací měření jednotlivých měřících metod. Výsledky přehledně zpracuje a vyhodnotí měřící metody z hlediska jejich přesnosti a také reprodukovatelnost měření. Dále student provede měření závislosti polarizační vidové disperze na teplotě pro pasivní prvky používané v optických přístupových sítích. Všechny naměřené výsledky graficky zpracuje a vyhodnotí.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, M. Optoelectronics for telecommunications and informatics. 1. 1. DALLAS USA: OPTOKON METHODE ELECTRONIC, 2010. 398 s. ISBN: 978-0-615-33185- 0.

[2] Rajiv Ramaswami, Kumar Sivarajan, and Galen Sasaki. 2009. Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition (3rd ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.

[3] Prat, J.: Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research Towards Unlimited Bandwidth Access. Springer, 2008, ISBN 9781402084706.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 26.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Radim Šifta

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## ABSTRAKT

Diplomová práca je rozdelená na dve časti. Prvá časť sa nesie v teoretickom duchu. Zaoberá sa matematicky a slovne všeobecným vznikom disperzií. Sústreďuje sa na vznik chromatickej a polarizačnej vidovej disperzie. V súvislosti s normou ITU-T sú tiež spomínané druhy optických vlákien pre kategóriu G.65X. Ďalšia pozornosť sa upriamuje najskôr na kompenzáciu a následne na meranie oboch spomínaných disperzií. Práca popisuje aj analyzátory merania a ich hlavné vlastnosti. Druhá časť práce sa venuje praktickým meraniam polarizačnej vidovej disperzie. Zo začiatku sú popísané použité komponenty využité pri zostrojení a meraní optických topológií, následne je spracovaný detailný rozbor každej optickej trasy. Záver tejto časti sa venuje výsledkom každej meracej metódy a ich vzájomným porovnaním. Merania v teplotnej komore sú predmetom ďalšej praktickej časti, ktorá zo začiatku zaznamenáva základné vlastnosti teplotnej komory. Dodatočne nasleduje popis meraní, analýza a záverečné zhodnotenie v závislosti hodnoty polarizačnej vidovej disperzie na teplote.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Chromatická disperzia, polarizačná vidová disperzia, kompenzácia disperzii, meranie disperzii, optické vlákna, analýza polarizačnej vidovej disperzie, teplota.

## ABSTRACT

Thesis is divided into two parts. The first part is written rather in theoretical way. It deals with general formation of the dispersion mathematically and verbally. It focuses on the chromatic and polarization mode dispersion. Different types of optical fibers for category G.65X are mentioned as well in connection with the ITU-T. Further attention is drawn first to compensation and then the measurement both of the mentioned dispersions. The thesis describes also analyzers and their main features. The second part is devoted to practical measurements of polarization mode dispersion. In the beginning there are described the components used for construction of the optical measurements and topologies. It is followed by an analysis of an each optical link. The results of these measurement methods and their mutual comparisons are at the end of this section. Measurements in temperature chamber is the subject of a further practical part, which from the beginning captures the essential features of the temperature chamber. This is followed by a description of the measurements, analyses and final valuation depending on the amount of polarization mode dispersion versus the temperature.

## KEYWORDS

Chromatic dispersion, polarization mode dispersion, compensation dispersion, measurement dispersion, optical fiber, polarization mode dispersion analysis, temperature.

KOVÁČ, Filip *Reprodukovatelnost a přesnost měření polarizační vidové disperze*: diplomová práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 129 s. Vedúci práce bol Ing. Radim Šifta,

## PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Reprodukovateľnosť a presnosť meraní polarizačnej vidovej disperzie“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

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

Brno .....

.....

(podpis autora)

## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Radimovi Šiftovi, za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť, podnetné návrhy k práci a firme PROFiber za zapožičanie analyzátoru a odborné konzultácie.

Brno .....

.....

(podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering  
and Communication  
Brno University of Technology  
Purkynova 118, CZ-61200 Brno  
Czech Republic  
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

## POĎAKOVANIE

Výzkum popsaný v tejto diplomovej práci bol realizovaný v laboratóriách podporených projektom SIX; registračné číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačný program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# OBSAH

Úvod	15
<b>1 Disperzie v optických sieťach</b>	<b>17</b>
1.1 Všeobecný základ a rozdelenie disperzií . . . . .	17
1.1.1 Disperzia . . . . .	19
1.2 Disperzie v jednovidových optických vláknach . . . . .	20
1.2.1 Chromatická disperzia (CD) . . . . .	20
1.2.2 Polarizačná vidová disperzia (PMD) . . . . .	27
1.3 Disperzie v mnohovidových vláknach . . . . .	31
1.3.1 Vidová Disperzia . . . . .	31
<b>2 Kompenzácia CD a PMD</b>	<b>33</b>
2.1 Kompenzácia chromatickej disperzie . . . . .	33
2.1.1 DCF kompenzácia . . . . .	33
2.1.2 FBG kompenzácia . . . . .	34
2.1.3 HOM vláknová kompenzácia . . . . .	38
2.2 Kompenzácia polarizačnej vidovej disperzie . . . . .	39
2.2.1 Optická PMD kompenzácia . . . . .	39
2.2.2 Optoelektronická PMD kompenzácia . . . . .	39
2.2.3 Elektrická PMD kompenzácia . . . . .	40
<b>3 Vlákná</b>	<b>42</b>
3.1 G.652 A, B, C a D . . . . .	44
3.2 G.653 A a B . . . . .	45
3.3 G.654 A, B a C . . . . .	45
3.4 G.655 C, D a F . . . . .	46
3.5 G.656 . . . . .	47
3.6 G.657 A a B . . . . .	48
<b>4 Meranie disperzií</b>	<b>50</b>
4.1 Metódy merania chromatickej disperzi . . . . .	50
4.1.1 Metóda fázového posunu a metóda diferenciálneho fázového posunu . . . . .	50
4.1.2 Metóda oneskorenia impulzov v časovej oblasti . . . . .	51
4.1.3 Metóda interferometrická . . . . .	53
4.2 Meranie polarizačnej vidovej disperzie . . . . .	53
4.2.1 Metóda skenovania vlnovej dĺžky . . . . .	54
4.2.2 TINTY . . . . .	54
4.2.3 GINTY . . . . .	55

4.2.4	SSA . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Analyzátory merania disperzií</b>	<b>58</b>
5.1	JDSU T-Berd®/MTS-8000 platform . . . . .	59
5.1.1	PMD modul . . . . .	59
5.1.2	OFS-11 – Optical fiber trace viewer . . . . .	60
5.2	EXFO FTB-500 platform . . . . .	60
5.2.1	FTB-5500B modul . . . . .	61
5.2.2	EXFO FLS-5800A (zdroj žiarenia) . . . . .	62
5.3	EXFO FTB-200 platform . . . . .	63
5.3.1	EXFO FTB-5700 modul . . . . .	63
5.3.2	FastReporter2 . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Praktická časť</b>	<b>65</b>
6.1	Komponenty pre merania optických topológií . . . . .	65
6.1.1	Vlákná . . . . .	65
6.1.2	Konektory . . . . .	65
6.1.3	Spojky . . . . .	66
6.1.4	PMD emulátor . . . . .	66
6.1.5	Analyzátory . . . . .	66
6.2	Topológie optických trás . . . . .	68
6.3	Výsledky analýz . . . . .	69
6.3.1	Merania na platforme MTS-8000 . . . . .	69
6.3.2	Grafický výstup - metóda skenovania vlnových dĺžok . . . . .	72
6.3.3	Merania na platforme EXFO FTB-5500B . . . . .	75
6.3.4	Grafický výstup - metóda interferometrická (GINTY) . . . . .	75
6.3.5	Merania na platforme EXFO FTB-5700 . . . . .	78
6.3.6	Grafický výstup - metóda skramblovania polarizačných stavov (SSA) . . . . .	78
6.3.7	Grafické porovnanie jednotlivých analyzátorov . . . . .	81
6.4	Merania v Teplotnej komore . . . . .	83
6.4.1	Teplotná komora Vötsch Vc <sup>3</sup> 7018 . . . . .	83
6.5	Popis meraní . . . . .	85
6.6	Analýza meraní . . . . .	87
6.7	Zhodnotenie meraní . . . . .	93
<b>7</b>	<b>Záver</b>	<b>97</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>99</b>
	<b>Zoznam symbolov, veličín a skratiek</b>	<b>106</b>





# ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Závislosť indexu lomu od vlnovej dĺžky pre disperzné prostredie [1]. . .	17
1.2	Znázornenie vlnového balíka [1]. . . . .	18
1.3	Závislosť indexu lomu $n$ a skupinového indexu lomu $n_{sk}$ od vlnovej dĺžky optického žiarenia [1]. . . . .	21
1.4	Rozšírenie impulzov vplyvom materiálovej disperzie [6]. . . . .	22
1.5	Závislosť materiálovej disperzie od vlnovej dĺžky pre čisté $SiO_2$ sklo a pre $SiO_2$ sklo s 13 percentami $GeO_2$ [1]. . . . .	23
1.6	Vlnovodová disperzia šírenie svetla [8]. . . . .	23
1.7	Chromatická disperzia jednovidového vlákna [6]. . . . .	24
1.8	Chromatická disperzia v konvenčnom vlákne [6]. . . . .	26
1.9	Chromatická disperzia v konvenčnom vlákne spolu s materiálovou a vlnovodovou disperziou [13]. . . . .	26
1.10	a) záporná chromatická disperzia, b) kladná chromatická disperzia [14].	27
1.11	Oneskorenie DGD svetelného impulzu medzi rýchlou a pomalou osou [15]. . . . .	28
1.12	Rozdiel medzi ideálnym a reálnym vláknom pri PMD [14]. . . . .	29
1.13	Vplyvy na PMD [14]. . . . .	29
1.14	Závislosť PMD na dĺžke vlákna [16]. . . . .	30
1.15	CD a PMD bežného vlákna [19]. . . . .	31
1.16	Šírenie impulzu svetlovodom a) mnohovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu b) mnohovidové gradientné vlákno c) jednovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu [6]. . . . .	32
2.1	Kompenzačná schéma chromatickej disperzie [10]. . . . .	33
2.2	DCF profily vlákien [16] . . . . .	34
2.3	Uniformná braggovská mriežka s konštantným indexom amplitúdy modulácie a periódy s grafom typického zobrazenia difrakčnej a vektorovej mriežky, ktorá má byť zhodná pre zachovanie hybnosti [17]. . .	35
2.4	Schéma prenosového profilu pre silné optické vlákno braggovskou mriežkou ukazuje stratu žiarenia módov na krátkej strane vlnovej dĺžky, ktorá sa prudko mení v závislosti na spôsobe štruktúry plášťa[17]. . .	36
2.5	Ukážka apodizovanej a neapodizovanej mriežky [17]. . . . .	36
2.6	a) schéma naklápajúcej braggovskej mriežky, b) vektorový diagram pre bragg stav naklápajúcej mriežky[17]. . . . .	37
2.7	a) schematický diagram chirped mriežky s neperiodickým sklonom. Pre dopredné šírenie svetla ako je ukázané, dlhšie vlnové dĺžky sa šírja ďalej v mriežke ktorá sa odráža b) schematický diagram kaskády z niekoľkých rastúcich periód, ktoré sa používajú na simuláciu dlhých chirped mriežok [17]. . . . .	37

2.8	Graf závislosti chromatickej disperzie na vlnovej dĺžke u HOM optických vlákien [16]. . . . .	38
2.9	Schéma kompenzácie HOM vlákna[16]. . . . .	38
2.10	Schéma optického kompenzátora PMD[23]. . . . .	39
2.11	Schéma optoelektronického kompenzátora PMD [15]. . . . .	40
2.12	Schéma elektrického kompenzátora[23]. . . . .	41
3.1	Útlmová charakteristika [14]. . . . .	42
3.2	Útlmová charakteristika optického vlákna [6]. . . . .	43
3.3	Závislosť merného útlmu na vlnovej dĺžke [26]. . . . .	49
4.1	Závislosť merného útlmu na vlnovej dĺžke [27]. . . . .	51
4.2	Metóda fázového posunu a diferenciálneho fázového posunu [21]. . . . .	52
4.3	Metóda oneskorenia impulzov v časovej oblasti [27]. . . . .	52
4.4	Metóda oneskorenia impulzov v časovej oblasti - OTDR [27]. . . . .	53
4.5	Metóda interferometrická [27]. . . . .	53
4.6	Metóda skenovania vlnovej dĺžky [11]. . . . .	54
4.7	TINTY metóda [28]. . . . .	55
4.8	GINTY metóda [28]. . . . .	56
4.9	SSA metóda [55]. . . . .	57
5.1	Meracie prístroje a) číselný displej b) displej s grafickým výstupom [32] [33]. . . . .	58
5.2	Analyzátor T-Berd®/MTS-8000 platform [35]. . . . .	59
5.3	PMD modul [36]. . . . .	60
5.4	Ukážka prístroja EXFO FTB 500(1.-8 slotová verzia, 2-4 slotová verzia) [39] [40]. . . . .	61
5.5	FTB-5500 PMD analyzátor [42]. . . . .	61
5.6	Zdroj žiarenia EXFO FLS-5834A [44]. . . . .	62
5.7	FTB-200 platform [48]. . . . .	63
5.8	FTB-5700 modul [51]. . . . .	63
6.1	Ukážka SC optických konektorov [56]. . . . .	67
6.2	Ukážka FC optických konektorov. . . . .	67
6.3	Ukážka optických spojok. . . . .	67
6.4	Ukážka PMD emulátora. . . . .	68
6.5	Zapojenie reálnej trasy [59]. . . . .	69
6.6	Priemerná hodnota PMD. . . . .	72
6.7	Štandardná odchýlka analyzátor a PMD. . . . .	73
6.8	Štandardná odchýlka analyzátor a s emulátorom a PMD. . . . .	73
6.9	Tolerančné pásmo. . . . .	74
6.10	Priemerná hodnota PMD. . . . .	76
6.11	Štandardná odchýlka analyzátor a PMD. . . . .	76
6.12	Štandardná odchýlka analyzátor a s emulátorom a PMD. . . . .	77

6.13	Tolerančné pásmo. . . . .	77
6.14	Priemerná hodnota PMD. . . . .	79
6.15	Štandardná odchýlka analyzátora a PMD. . . . .	79
6.16	Štandardná odchýlka analyzátora s emulátorom a PMD. . . . .	80
6.17	Tolerančné pásmo. . . . .	80
6.18	Porovnanie priemernej hodnoty PMD zmeranej rôznymi metódami. . . . .	81
6.19	Porovnanie priemernej hodnoty PMD zmeranej rôznymi metódami (stĺpcové zobrazenie). . . . .	82
6.20	Porovnanie štandardnej odchýlky jednotlivých analyzátorov. . . . .	82
6.21	Porovnanie štandardnej odchýlky spolu s emulátorom pre jednotlivé analyzátory. . . . .	83
6.22	Teplotná komora Vötsch Vc <sup>3</sup> 7018 [64]. . . . .	84
6.23	Etalón teplôt pre konektory, zvary, ODN a delič . . . . .	85
6.24	Etalón teplôt pre vlákna. . . . .	86
6.25	Ukážka zapojenia pracoviska a teplotnej komory (vo vnútri meraná vzorka vlákna G.657). . . . .	86
6.26	Ukážka meraných prvkov. . . . .	86
6.27	Ukážka zapojenia do analyzátora a zdroja žiarenia. . . . .	87
6.28	Štatistický graf konektor SC-PC. . . . .	88
6.29	Štatistický graf konektor FC-PC. . . . .	89
6.30	Štatistický graf konektor SC-APC. . . . .	89
6.31	Štatistický graf konektor FC-APC. . . . .	90
6.32	Štatistický graf konektor E2000-APC. . . . .	90
6.33	Štatistický graf vlákna G.652.D. . . . .	91
6.34	Štatistický graf vlákno G.657. . . . .	91
6.35	Štatistický graf pre zvary. . . . .	92
6.36	Štatistický graf pre ODN. . . . .	92
6.37	Štatistický graf pre delič. . . . .	93
6.38	Konektor SC-PC bez extrémov. . . . .	94
6.39	Konektor SC-PC. . . . .	95
6.40	Konektor SC-APC bez extrémov. . . . .	95
6.41	Konektor E2000-APC bez extrémov. . . . .	96
1	Topológia. . . . .	113
2	Príloha 1.1. . . . .	114
3	Príloha 1.2. . . . .	115
4	Príloha 2.1. . . . .	116
5	Príloha 2.2. . . . .	117
6	Príloha 3.1. . . . .	118
7	Príloha 3.2. . . . .	119
8	Príloha 4. . . . .	120

9	Príloha 5. . . . .	121
10	Príloha 6. . . . .	122
11	Príloha 7. . . . .	123
12	Príloha 8. . . . .	124
13	Príloha 9. . . . .	125
14	Príloha 10. . . . .	126
15	Príloha 11. . . . .	127
16	Príloha 12. . . . .	128
17	Príloha 13. . . . .	129

# ZOZNAM TABULIEK

1.1	Limitné hodnoty CD podľa ITU-T G.695 [6]. . . . .	25
1.2	Priamo modulované zdroje – DML (1550 nm) – $\lambda_W \sim 0,5$ nm [14]. . . . .	27
1.3	Externe modulované zdroje – EML (1550 nm) – $\lambda_W \sim 0,024$ nm [2,5 Gbit/s] [14]. . . . .	27
1.4	Limitné hodnoty PMD podľa ITU-T G.697 [6]. . . . .	30
3.1	Jednotlivé pásma vlnových optických dĺžok jednovidových vlákien [6].	44
3.2	Norma ITU-T G.652 A, B, C a D – konvenčné vlákna [14]. . . . .	44
3.3	Norma ITU-T G.653 A a B – vlákna s posunutou disperziou [14]. . . . .	45
3.4	Norma ITU-T G.654 A, B a C – vlákna s posunutou medznou vlnovou dĺžkou [14]. . . . .	46
3.5	Norma ITU-T G.655 C, D a F – vlákna s posunutou nenulovou disperziou [14]. . . . .	47
3.6	Norma ITU-T G.656 – vlákna s posunutou nenulovou disperziou pre širokopásmový optický prenos [14]. . . . .	48
3.7	Norma ITU-T G.657 A a B – vlákna necitlivé na ohyby pre prístupové siete [14]. . . . .	48
6.1	Neistota analyzátora T-Berd® [36]. . . . .	71
6.2	Etalónové hodnoty emulátora. . . . .	71
6.3	Neistota analyzátora EXFO FTB-500 [42]. . . . .	75
6.4	Neistota analyzátora EXFO FTB-200 [52]. . . . .	78

# ÚVOD

V minulosti bolo optické vlákno a vôbec aj samotná optická sieť pre väčšinu ľudí veľká neznáma. Mnohí sa možno ani dnes nestretli s týmto pojmom. Medzi nich však určite nepatria ľudia, ktorí sa venujú výskumu, pripravujú testy, analyzujú a v neposlednom rade sa venujú samotnej výstavbe optických trás, či už je to na metropolitnej báze alebo v oblastiach prístupových sietí. Z dôvodu pomerne rýchlej globalizácie v prvotnej fáze ethernetu teraz aj optických vlákien sa čoraz viac prikláňa k výstavbe optických trás. Svoju úlohu v tom určite zohrávajú aj samotní zákazníci, ktorí požadujú spoľahlivý, bezpečný prenos dát vysokou rýchlosťou aj na väčšie vzdialenosti od ústrední. U optického vlákna sa však tiež nezaobídeme bez degradovania signálu. Mám na mysli disperzie. Konkrétne chromatickú a polarizačnú vidovú disperziu, ktoré ovplyvňujú výsledný signál. Chromatická disperzia vzniká z materiálovej a vlnovodovej disperzie. Takže závisí od materiálu od ktorého sa všetko následne odvíja. Polarizačná vidová disperzia vzniká anizotropnými vlastnosťami ako sú tlak, ťah, skrut optického vlákna či teplota. Tomuto javu sa dá samozrejme z určitej časti zabrániť. Pravidelným premeriavaním optickej trasy a sledovaním rozdielov parametrov v určitých dekádach a ich následným eliminovaním. Cieľom tejto práce je v prvej časti porovnať presnosť meracích metód rozličných analyzátorov a sledovať odchýlku medzi jednotlivými testami pri meraní polarizačnej vidovej disperzie. V druhej časti je zamerané na teplotu, parameter ktorý patrí do skupiny vlastností, ktoré ovplyvňujú polarizačnú vidovú disperziu.

V prvej kapitole sa venujem podrobnému popisu disperzie ako takej (matematický popis, ale aj slovný princíp vzniku). Ďalej sa zaoberám disperziami v jednovidových optických vláknach a to chromatickou a polarizačnou vidovou disperziou. Sú tu popísané obe spomenuté disperzie aj ich vplyvy, ktoré ich predurčujú k vzniku. Nakoniec prejdem k mnohovidovým vláknam a popisujem vznik vidovej disperzie.

Druhá kapitola sa zaoberá kompenzáciou oboch disperzií. Príkladne popisuje a ukazuje ako je možné predísť a eliminovať chromatickú a polarizačnú vidovú disperziu pomocou jednotlivých metód kompenzácií.

Tretia kapitola obsahuje stručné prehľady optických vlákien z normy ITU-T. Zameriava sa na vlákna, ktoré sú používané v metropolitných, prístupových sieťach a vlákna, ktoré kompenzujú disperziu.

Štvrtá kapitola je celá o meraniach disperzií. Pre chromatickú disperziu nie vždy stačí predchádzanie vzniku pomocou výpočtu, preto sa musí pristúpiť k meracej metóde. Medzi metódy merania chromatickej disperzie patria meranie fázového posunu, metóda diferenciálneho fázového posunu, metóda oneskorenia impulzov v časovej oblasti, metóda OTDR a nakoniec metóda interferometrická, ktorá je však nevhodná pre meranie optických trás.

Polarizačnú vidovú disperziu môžeme merať metódou skenovania vlnovej dĺžky, polarimetrickou metódou (nevhodná), TINTY, GINTY a SSA. Každá metóda je tu popísaná a doplnená ilustráciou.

Piata kapitola zachytáva jednotlivé vlastnosti troch rôznych analyzátorov, formou popisu a ilustrácií, ktoré boli použité pri meraní polarizačnej vidovej disperzie.

Šiesta kapitola je samotná praktická časť. Zo začiatku sú popisované použité komponenty, ktoré boli použité pre meranie a zostavenie optických trás. Na ukážku je tu pár ilustrácií pre predstavenie ako konkrétna vec vyzerá. Za tým boli hneď rozobrané topológie optických trás, podľa ktorých meranie prebiehalo. Ďalej sa venovala pozornosť zvlášť každej metóde merania, ktorú daný analyzátor využíval. V prílohách sú zobrazené namerané výsledky a vypočítané parametre. Tie sú sprevádzané prehľadnými grafickými výstupmi. V poslednej časti sú porovnané navzájom metódy merania každého analyzátoru konkrétne metóda skenovania vlnových dĺžok, GINTY a SSA. Opäť je to všetko sprevádzané grafickými výstupmi. Ďalšia časť sa venuje meraniam v teplotnej komore. Na prvých pár riadkoch sú spomenuté základné vlastnosti teplotnej komory. Za nimi nasleduje popis ako merania prebiehali, rozbor meraní a samotné zhodnotenie zistených výsledkov je predmetom záveru tejto kapitoly (všetko je sprevádzané grafickými ilustráciami).

# 1 DISPERZIE V OPTICKÝCH SIETĎACH

## 1.1 Všeobecný základ a rozdelenie disperzií

Všeobecný základ disperzií je spojený s fázovou a skupinovú rýchlosťou šírenia. Fázová a skupinová rýchlosť sa menia v závislosti na zmene geometrie, indexu lomu, čo vyvolá ich zmenu frekvenčnej závislosti [6]. Ak sa v optickom vlákne spoja dve disperzie dochádza k javu kedy sa vlny šíria rôznou rýchlosťou. V nasledujúcich pár stranách bude s ich vznikom, princípom a závislosťami oboznámené.

### Fázová rýchlosť

Harmonickú vlnu v kladnom smere osi vyjadríme ako :

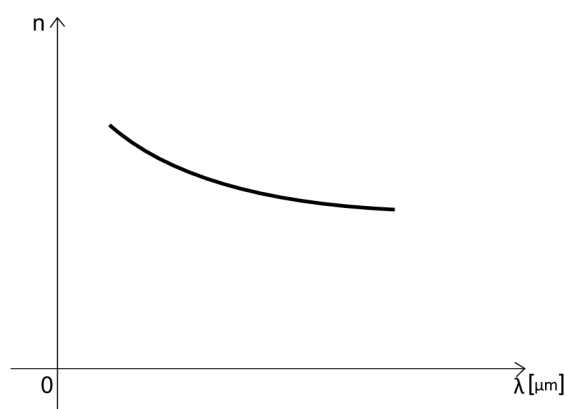
$$u(z, t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot z) \quad [-], \quad (1.1)$$

kde  $A$  je amplitúda,  $\cos$  je kosínus,  $\omega$  je uhlová frekvencia,  $t$  je čas,  $k$  je vlnový vektor a  $z$  je súradnica miesta. Pokiaľ splníme podmienku  $\omega \cdot t - kz = \text{konšt.}$  hovoríme o vlne, ktorá má konštantnú fázu. Keď rovnicu zderivujeme podľa času dostaneme :

$$\omega - k \cdot \frac{dz}{dt} = 0 \quad \text{alebo} \quad v_F = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} \quad [\text{m/s}], \quad (1.2)$$

$v_F$  je fázová rýchlosť s ktorou sa posúva miesto, kde je fáza vlny konštantná. Pričom  $\omega$  je uhlová frekvencia,  $k$  je vlnový vektor,  $dz$  je derivácia podľa súradnice miesta,  $dt$  derivácia podľa času a  $v_F$  je fázová rýchlosť. Teda ak  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  a  $n = \frac{c}{v}$  môžeme povedať, že v materiáloch, kde je fázová rýchlosť funkciou vlnovej dĺžky, potom je od nej závislý aj index lomu :

$$n = f(\lambda) \quad [-]. \quad (1.3)$$



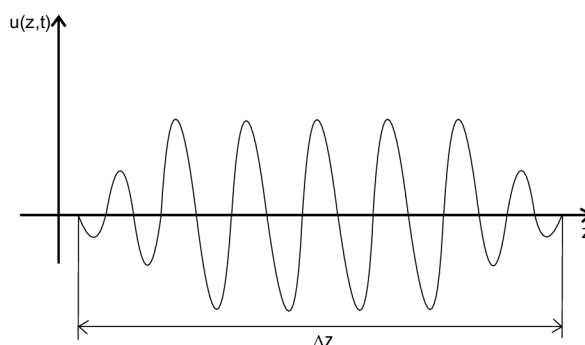
Obr. 1.1: Závislosť indexu lomu od vlnovej dĺžky pre disperzné prostredie [1].



Kde  $k$  je vlnový vektor,  $\pi$  je Ludolfovo číslo (3,14159),  $n$  je index lomu prostredia,  $c$  je rýchlosť svetla v materiálovom médiu,  $v$  je rýchlosť šírenia,  $f$  je frekvencia a  $\lambda$  je vlnová dĺžka. Tento jav sa nazýva aj disperzia. Graf tejto závislosti je zobrazený na obr.1.1 [1]. Fázová rýchlosť môže mať väčšiu rýchlosť ako svetlo vo vákuu [2].

### Skupinová (grupová) rýchlosť

Skupinová rýchlosť je prenos energie vlnením. Pri prenose energie sa môžu vlnou šíriť signály, takže skupinová rýchlosť nemôže byť väčšia ako rýchlosť svetla vo vákuu [2]. Vlna typu (1.1) signál neprenáša, pretože každé „maximum“, ktoré nasleduje je rovnaké ako to predtým. Pre prenos signálov je vlnu potreba modifikovať alebo ju obmedziť na určité  $\Delta t$  (časová oblasť) (obr. 1.2) [1].



Obr. 1.2: Znázornenie vlnového balíka [1].

Ak sa vlna skladá z viacerých harmonických vln s rôznymi frekvenciami, teda nie je monochromatická, vlny vytvárajú skupiny - grupy alebo vlnový balík. Rýchlosť balíka určuje skupinová rýchlosť, pričom rýchlejšie vlny vznikajú na konci a šíria sa dopredu a na prednom konci zanikajú. Skupinová rýchlosť pre disperzné prostredie je daná vzťahom [2]:

$$v_G = \frac{d\omega}{dk} \quad [\text{m/s}]. \quad (1.4)$$

Pre nedisperzné prostredie je skupinová rýchlosť rovná fázovej rýchlosti [1]

$$v_G = v_F, \quad (1.5)$$

kde  $v_G$  je grupová rýchlosť,  $d\omega$  je derivácia podľa uhlovej frekvencie,  $dk$  je derivácia podľa vlnového vektora a  $v_F$  je fázová rýchlosť.

### 1.1.1 Disperzia

Disperzia má za následok skreslenie signálu. Je zapríčinená aj tým, že je nemožné vytvoriť monochromatický zdroj svetla. Chromatická disperzia závisí od šírky frekvenčného pásma. Čím je menšie toto pásmo, tým je disperzia menšia. K jej zväčšeniu dochádza pri rozličnej vlnovej dĺžke svetla. Vidová disperzia vzniká pri nerovnomernosti dráh pre jednotlivé vidy. Vznik disperzie a jej rozdelenie bude rozobrané v nasledujúcej kapitole.

#### Úvod do disperzie

Harmonický signál sa šíri rýchlosťou v prostredí, ktorého fázová konštanta je  $\beta(\omega)$

$$v = \frac{\omega}{\beta(\omega)} \quad [\text{m/s}], \quad (1.6)$$

kde  $v$  je rýchlosť šírenia,  $\omega$  je uhlová frekvencia,  $\beta(\omega)$  je fázová konštanta. Pre rýchlosť v homogénnom optickom prostredí platí:

$$v = \frac{c}{n} \quad [\text{m/s}], \quad (1.7)$$

potom môžeme zapísať [1]:

$$\beta = n \cdot \frac{\omega}{c} \quad [\text{rad/m}], \quad (1.8)$$

kde  $v$  je rýchlosť šírenia,  $c$  je rýchlosť svetla v materiálovom médiu,  $n$  je index lomu prostredia,  $\beta$  konštanta šírenia a  $\omega$  je uhlová frekvencia. Pri prenášaní signálu určitou skupinou vln vzniká skupinová rýchlosť šírenia:

$$v_{\text{sk}} = \left. \frac{\partial \omega}{\partial \beta} \right|_{\omega_0} \quad [\text{m/s}], \quad (1.9)$$

kde  $v_{\text{sk}}$  je skupinová rýchlosť,  $\partial \omega$  je parciálna derivácia uhlovej frekvencie,  $\partial \beta$  je parciálna derivácia konštanty šírenia a  $\omega_0$  je nosná frekvencia. Potom môžeme určiť skupinovú dobu oneskorenia vzťahom:

$$\tau_{\text{sk}} = \frac{1}{v_{\text{sk}}} \cdot L = \frac{\partial \beta(n_1, n_2, \lambda, \text{vid}, \text{polarizácia})}{\partial \omega} \cdot L \quad [\text{s}], \quad (1.10)$$

kde  $\tau_{\text{sk}}$  je skupinové oneskorenie,  $v_{\text{sk}}$  je skupinová rýchlosť,  $L$  je dĺžka optického vlákna,  $\partial \beta$  je parciálna derivácia konštanty šírenia,  $n_1$  je index lomu jadra,  $n_2$  index lomu plášťa,  $\lambda$  je vlnová dĺžka a  $\partial \omega$  je parciálna derivácia uhlovej rýchlosti. Rovnica (1.10) plní teda funkciu indexu lomu jadra a plášťa, vlnovej dĺžky. Vlnovú dĺžku definujeme pre každý vid samostatne [1]. Disperzia v optickom vlákne spôsobuje skreslenie signálu, ktorý sa vláknom prenáša. Vyjadríme ho ako rozdiel šírky impulzu v polovici výšky na konci a na začiatku vlákna. Disperzia je dôležitým parametrom optických vlákien a určuje šírku prenášaného pásma a aj rýchlosť [3].

Rozširovanie impulzov v optických prenosoch majú na starosti tieto nezávislé javy [1]:

- materiálová disperzia,
- vlnovodová disperzia,
- vidová disperzia,
- polarizačná disperzia.

## 1.2 Disperzie v jednovidových optických vláknach

V jednovidových optických vláknach vzniká chromatická disperzia a tak tiež aj polarizačná vidová disperzia. Tá vznikne kombináciou materiálovej disperzie a disperzie vlnovodovej, ktorá je spôsobená zmenou geometrie vidu a tým zmeny fázovej a skupinovej rýchlosti šírenia pri zmene frekvencie. Vidovú (módovú) disperziu môžeme pri jednovidových vláknach vypustiť, pretože pri nich nemá veľký význam a teda tu nevzniká. V prípade polarizačnej vidovej disperzie je to naopak, tá vzniká [6] [22].

### 1.2.1 Chromatická disperzia (CD)

#### Materiálová disperzia

K materiálovej disperzii dochádza preto, lebo šírenie svetelného impulzu je závislé na interakcii vlnových dĺžok s indexom lomu jadra vlákna. Rôzne vlnové dĺžky sa prenášajú rozdielnou rýchlosťou v optickom materiály. Rôzne vlnové dĺžky svetelného impulzu, ktoré vstúpia do vlákna naraz opustia vlákno, ale v rôznych časoch. Materiálová disperzia je funkcia zdrojovej spektrálnej šírky. Spektrálna šírka špecifikuje rozsah vlnových dĺžok, ktoré sa môžu šíriť vo vlákne. Materiálny rozptyl je menší na dlhších vlnových dĺžkach [7]. Všetky dielektrické materiály sú disperzné. Takže index lomu sa mení s vlnovou dĺžkou ( $n = f(\lambda)$ ). Existuje niekoľko spôsobov ako merať disperziu v priehľadných materiáloch. Jednoduchým meraním je Abbeho číslo. Abbeho číslo sa získa tým, že sa zmeria index lomu v niekoľkých kľúčových vlnových dĺžkach alebo

$$V_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad [-], \quad (1.11)$$

kde  $n_D, n_F, n_C$  sú indexy lomu v troch štandardných viditeľných vlnových dĺžkach a to:  $\lambda_F = 486,1 \text{ nm}$  (modrá),  $\lambda_D = 589,2 \text{ nm}$  (žltá),  $\lambda_C = 656,3 \text{ nm}$  (červená)[4]. Charakterizujú vlastnosti optického skla. Čím je jeho hodnota menšia, tým je lom svetla v optickom vlákne väčší [5]. Najviac disperzné sú kremenné sklá s  $V_D$  v rozsahu 30–40. Menej disperzné sú korunné sklá a majú vyššie Abbeho čísla. Silica má  $V_D = 68$ . Fluoridové sklá majú celkom nízku disperziu, s rozsahom 70–80 [4]. Bežné hodnoty sa pohybujú v rozmedzí 20–70 [5].

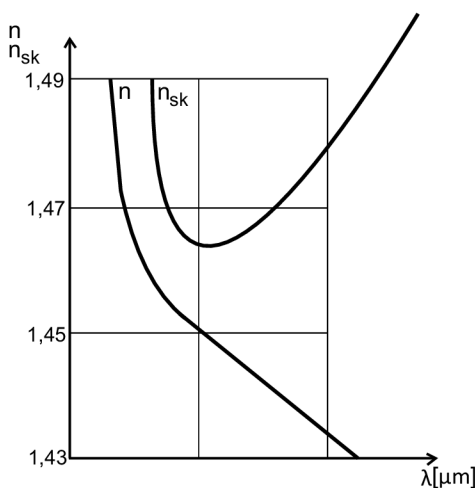
Závislosť indexu lomu od vlnovej dĺžky je daná Sellmeierovou rovnicou :

$$\tau'_{sk} = \frac{\tau_{sk}}{L} = \frac{1}{v_{sk}} = \frac{n_{sk}}{c} = \frac{\partial\beta}{\partial\omega} \quad [s], \quad (1.12)$$

kde

$$n_{sk} = n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} = n + \frac{dn}{d\omega} \cdot \omega \quad [-], \quad (1.13)$$

pričom  $\tau_{sk}$  skupinové oneskorenie,  $L$  je dĺžka optického vlákna,  $v_{sk}$  je skupinová rýchlosť,  $n_{sk}$  je skupinový index,  $c$  je rýchlosť svetla v materiálovom médiu,  $\partial\beta$  je parciálna derivácia konštanty šírenia,  $\partial\omega$  je parciálna derivácia uhlovej frekvencie,  $n$  je index lomu prostredia,  $\lambda$  je vlnová dĺžka,  $dn$  je derivácia indexu lomu prostredia,  $d\lambda$  je derivácia vlnovej dĺžky,  $d\omega$  je derivácia uhlovej frekvencie a  $\omega$  je uhlová frekvencia. Graf priebehu  $n$  a  $n_{sk}$  na vlnovej dĺžke  $\lambda$  je zobrazený na obr.1.3.



Obr. 1.3: Závislosť indexu lomu  $n$  a skupinového indexu lomu  $n_{sk}$  od vlnovej dĺžky optického žiarenia [1].

Odlíšnosť oneskorení dvoch skupinových signálov, ktoré sa prenášajú na spoločnom vide s rôznou vlnovou dĺžkou vo vzdialenosti medzi sebou o  $\Delta t$  (časová oblasť) je daný rozvojom radu :

$$\Delta\tau'_{sk} = \frac{d\tau_{sk}}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2\tau_{sk}}{d\lambda^2} \cdot (\Delta\lambda^2) + \dots \quad [s], \quad (1.14)$$

kde  $\tau_{sk}$  je fázové oneskorenie,  $d\tau_{sk}$  je derivácia skupinového oneskorenia,  $d\lambda$  je derivácia vlnovej dĺžky,  $\Delta\lambda$  je šírka pásma a  $d^2\tau_{sk}$  je druhá derivácia skupinového oneskorenia. Graficky je to znázornené na obr. 1.4. Rovinná vlna v nekonečnom médiu, kde platí  $\beta = k_0 \cdot n$  je

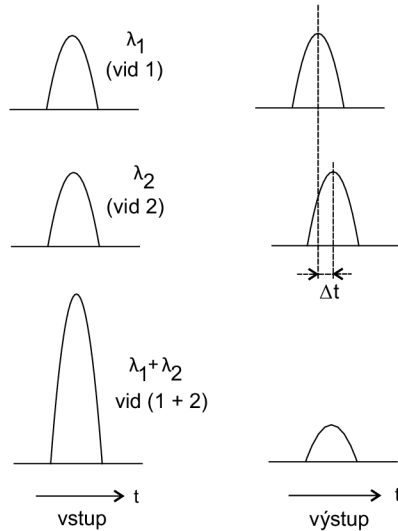
$$\tau_{sk} = L \cdot \frac{n}{c} \quad [s] \quad \text{potom} \quad \Delta_{sk} = 0, \quad (1.15)$$

pričom  $\beta$  je konštantna šírenia,  $k_0$  je nulový vlnový vektor,  $n$  index lomu prostredia,  $\tau_{sk}$  je skupinové oneskorenie,  $L$  je dĺžka optického vlákna,  $n$  je index lomu prostredia,  $c$  je

rýchlosť svetla v materiálovom médiu a  $\Delta_{sk}$  rozdiel skupinového indexu lomu jadra a plášťa. Toto skupinové oneskorenie je ovplyvnené materiálovými vlastnosťami skla. Pri podmienke  $\beta = k_0 \cdot n$  a rovniciach (1.14) a (1.15) platí:

$$\frac{\Delta\tau_{sk}}{L} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2n}{d\lambda^2} \cdot \Delta\lambda - \frac{1}{2c} \cdot \left( \frac{d^2n}{d\lambda^2} + \lambda \frac{d^3n}{d\lambda^3} \right) \cdot (\Delta\lambda)^2 \quad [\text{s/km}], \quad (1.16)$$

kde  $\Delta\tau_{sk}$  je rozdiel skupinových oneskorení,  $L$  je dĺžka optického vlákna,  $\lambda$  je vlnová dĺžka,  $c$  je rýchlosť svetla v materiálovom médiu,  $d^2n$  je druhá derivácia indexu lomu prostredia,  $d\lambda^2$  je derivácia druhej mocniny vlnovej dĺžky,  $\Delta\lambda$  šírka pásma,  $d^3n$  je tretia derivácia indexu lomu prostredia a  $d\lambda^3$  je derivácia tretej mocniny vlnovej dĺžky. Čisté kremičité sklo má  $\lambda_0 = 1270$  nm. Disperzia v tejto časti je úmerná  $\Delta\lambda^2$  a má hodnotu  $10^{-2}$  ps/(km · nm). Z tohoto hľadiska je pracovať pri materiálovej disperzii v oblastiach 1270 nm. Pri 850 nm sa  $\Delta\lambda^2 \approx -80$  ps/(km · nm).

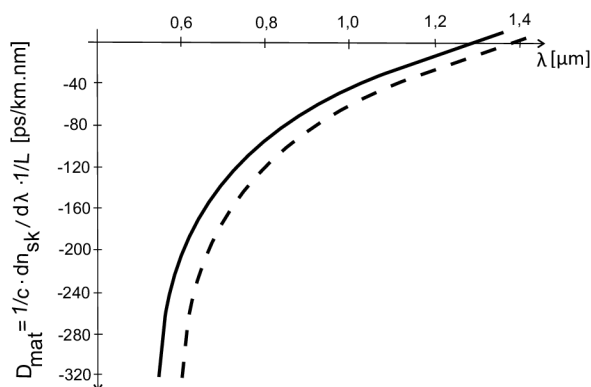


Obr. 1.4: Rozšírenie impulzov vplyvom materiálovej disperzie [6].

Z grafu na obr. 1.5 je vidno, že materiálová disperzia je nulová okolo  $\lambda = 1300$  nm pre klasické telekomunikačné vlákno. Materiálovú disperziu môžeme popísať druhou deriváciou indexu lomu  $n$  podľa kruhovej frekvencie  $\omega$ , či disperzným koeficientom  $D(\lambda)$  definovaným ako :

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad [\text{ps/nm} \cdot \text{km}][1], \quad (1.17)$$

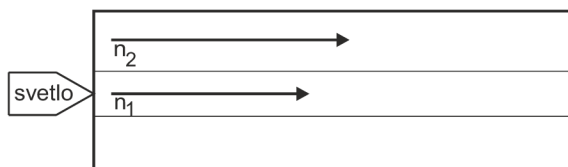
kde  $\lambda$  značí vlnovú dĺžku,  $d^2n$  je druhá derivácia indexu lomu prostredia,  $c$  je rýchlosť svetla v materiálovom médiu,  $d\lambda^2$  je derivácia druhej mocniny vlnovej dĺžky.



Obr. 1.5: Závislosť materiálovej disperzie od vlnovej dĺžky pre čisté  $SiO_2$  sklo a pre  $SiO_2$  sklo s 13 percentami  $GeO_2$  [1].

### Vlnovodová disperzia

Vlnovodová disperzia je dôležitá pri jednovidových vláknach, u mnohovidových vláknach ju môžeme zanedbať[8]. Príčinou vlnovodovej disperzie je, že konštanta šírenia je rozličná pre každý vid, čo spôsobuje zmenu kmitočtu a to má za následok zmenu rýchlosti šírenia[6]. Vlnovodová disperzia je spôsobená tým, že časť svetla sa pohybuje v plášti vlákna, narozdiel od väčšiny svetla, ktoré sa šíri jadrom optického vlákna ako je to zobrazené na obr. 1.6.



Obr. 1.6: Vlnovodová disperzia šírenie svetla [8].

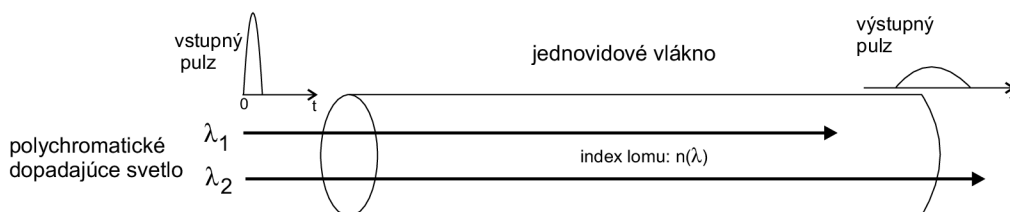
Vzhľadom k tomu, že plášť je vyrobený z materiálu, ktorý má nižší index lomu ako jadro vlákna, svetelný lúč, ktorý sa pohybuje v plášti sa šíri rýchlejšie ako v jadre optického vlákna. Rozdiely indexu lomu jadra a plášťa v jednom optickom vlákne sú nepatrné, ale na väčšie vzdialenosti sa môžu stať ovplyvňujúcim faktorom[8]. Všeobecne pre vlnovodový mód platí pri uhlovej frekvencii  $\omega(\beta)$  a pri šírení konštantnej  $\beta$  (tak, že elektromagnetické polia v prenosovom smere kolíšu a sú úmerné  $(\beta z - \omega t)$ ), potom skupinovú rýchlosť disperzie definuje parameter  $D$  ako:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = \frac{2\pi c}{v_g^2 \lambda^2} \cdot \frac{dv_g}{d\omega} \quad [\text{ps/nm} \cdot \text{km}], \quad (1.18)$$

kde  $\lambda = 2\pi c/\omega$  je vákuová vlnová dĺžka a  $v_g = d\omega/d\beta$  je skupinová rýchlosť. Tento vzorec zahŕňa vlnovodový aj materiálový rozptyl. Dôvodom pre definovanie disperzie v tomto smere je to, že  $|D|$  je časové rozširovanie impulzu  $\Delta t$  za jednotku šírky pásma  $\Delta\lambda$  na jednotku prejdenej vzdialenosti obvykle vyjadrené v ps/(km · nm) pre optické vlákna[9].

V optickom vlákne sa k materiálovej disperzii pridáva aj disperzia vlnovodová, ktorá je spôsobená nelineárnou frekvenčnou závislosťou skupinovej rýchlosti vidu v optickom vlákne (obr.1.7). Toto má za následok vznik chromatickej disperzii. Šírka svetlovodu je nepriamo úmerná šírke svetelného zdroja. Ku príkladu polovodičovým laserom môžeme prenášať 400-krát širšie pásmo ako u zdroja s luminiscenčnou diódou [6]. Chromatická disperzia sa niekedy označuje ako intramodálna alebo aj vnútromódová disperzia[7]. Nie je to náhodný jav a dá sa riešiť výpočtom, ale hlavne kompenzáciami. Vplyv káblu, okolitého prostredia a inštalácie trasy je zanedbateľný [11].

Svetlo sa pohybuje v prostredí pomalšie ako vo vákuu. Rýchlosť akou sa šíri svetlo je určené prostredím indexu lomu. V ideálnom prípade index lomu nezávisí na vlnovej dĺžke svetla. Keďže tento prípad neberieme do úvahy, pretože rôzne vlnové dĺžky sa šíria rozdielnou rýchlosťou v rámci optického vlákna. Chromatická disperzia vlákna sa vyjadruje v ps/(nm · km), čo predstavuje rozdiel oneskorenia alebo čas šírenia v ps pre zdroj so spektrálnou šírkou 1 nm šíriacim sa na 1 km vlákna.



Obr. 1.7: Chromatická disperzia jednovidového vlákna [6].

Koeficient chromatickej disperzie je :

$$D_{\text{chr}} = c_0 \cdot f \cdot \frac{dt_s}{df} \quad [\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}], \quad (1.19)$$

pričom  $c_0$  je rýchlosť svetla vo vákuu,  $f$  je frekvencia,  $dt_s$  je derivácia skupinového oneskorenia a  $df$  je derivácia frekvencie. Pri optických vláknoch sa dá zvoliť frekvencia aby bola chromatická disperzia nulová v strede prenášaného pásma. Pre SiO<sub>2</sub> jednovidové vlákna je materiálová disperzia nulová pri vlnovej dĺžke 1,28 μm a pre vlnovú dĺžku 1,33 μm kedy je nulová chromatická disperzia tohoto vlákna. Takýmto spôsobom sa u jednovidových vlákien dosahuje rozšíriteľnosť prenosového pásma. Šírenie impulzu jednovidovým vláknom je dané podmienkou prenosu prvého koreňa

Besselovskej funkcie kedy musí byť splnené :

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA \leq 2,405, \quad (1.20)$$

kde  $v$  rýchlosť šírenia,  $\pi$  je Ludolfovo číslo (3,14159),  $a$  polomer jadra,  $NA$  je numerická apertúra. Chromatická disperzia sa ešte donedávna nemerala. Pri požiadavkách na väčšie prenosové kapacity s využitím hustého vlnového multiplexu (dense wavelength division multiplex) vznikla potreba merania tejto disperzie. Týmto systémom sa šíri naraz niekoľko od seba odlišných vlnových dĺžok s rôznou rýchlosťou. Keďže sa vo vlákne šíri viacej spektrálnych zložiek, pri niektorých dôjde k oneskoreniu oproti pôvodnému vstupnému impulzu pri prechode optickým vláknom. Oneskorený impulz sa bude šírením vo vlákne časovo rozťahovať. Zdeformovaný impulz má potom za následky skreslenie prenášanej informácie, ktorá je zapríčinená jeho zasahovaním do vedľajších bitových medzier. Koeficient chromatickej disperzie nám definuje jej veľkosť a je daný :

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad [\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}], \quad (1.21)$$

kde  $t_g$  udáva zmenu skupinového oneskorenia a závisí na vlnovej dĺžke  $\lambda$ . Priebeh chromatickej disperzie je zobrazený na obr. 1.8 a obr. 1.9. V tab. 1.1 sú uvedené maximálne hodnoty koeficientov CD podľa normy ITU-T G.695. Koeficient udáva rozšírenie impulzu v ps, pri využití zdroja so spektrálnou pološírkou 1 nm pri prechode optickým vláknom dĺžky 1 km [6].

Tab. 1.1: Limitné hodnoty CD podľa ITU-T G.695 [6].

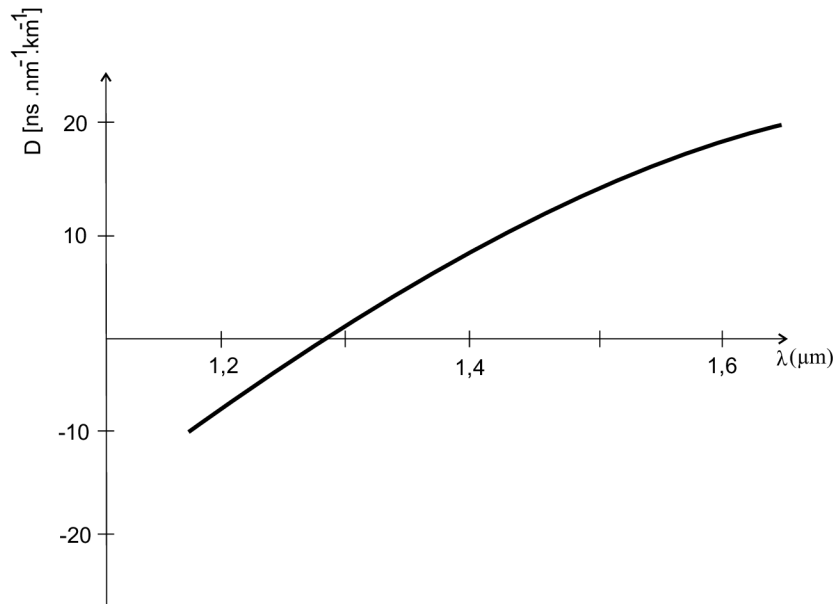
Vlnové dĺžky $\lambda$ [nm]	Koeficient chromatickej disperzie $D(\lambda)$ [ps/(nm · km)]
1291 - 1351	5,7
1311 - 1371	6,8
1391 - 1451	11,5
1531 - 1591	19,9
1471 - 1611	21,1

Typická hodnota koeficientu CD: 17 ps/(nm · km) pre vlnovú dĺžku 1550 nm [19]. Na obr. 1.9 je zobrazená totálna chromatická disperzia, ktorá má hodnotu približne 1,32  $\mu\text{m}$ . Hodnota CD má dve hodnoty :

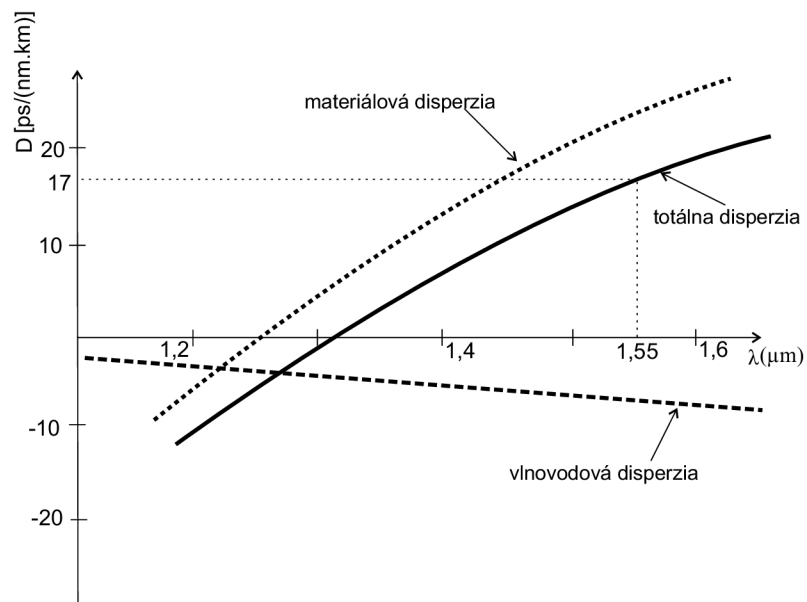
- záporná hodnota – spektrálne zložky s kratšou vlnovou dĺžkou sa šíria pomalšie ako spektrálne zložky s dlhšou vlnovou dĺžkou
- kladná hodnota – spektrálnej zložky s kratšou vlnovou dĺžkou sa šíria rýchlejšie ako spektrálne zložky s dlhšou vlnovou dĺžkou.

Ilustrované je to na obr. 1.10 [14].





Obr. 1.8: Chromatická disperzia v konvenčnom vlákne [6].

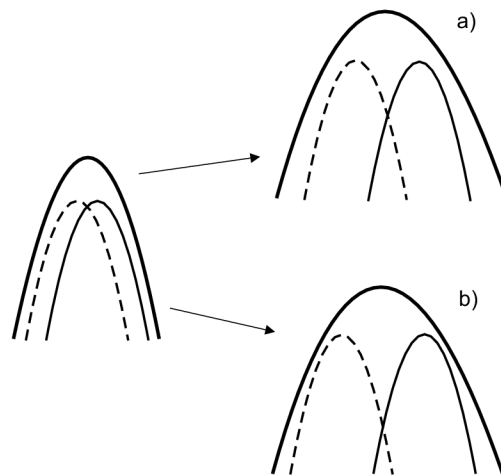


Obr. 1.9: Chromatická disperzia v konvenčnom vlákne spolu s materiálovou a vlnovodovou disperziou [13].

Preklenuteľná vzdialenosť chromatickej disperzie je ukázaná v tab.1.2 a tab.1.3.

$$L = 1000 / (\lambda_W \cdot D \cdot Bit) \quad [\text{km}], \quad (1.22)$$

pričom  $L$  je dĺžka optického vlákna,  $\lambda_W$  je šírka spektrálnej čiary zdroja,  $D$  je chromatická disperzia a  $Bit$  je prenosová rýchlosť.



Obr. 1.10: a) záporná chromatická disperzia, b) kladná chromatická disperzia [14].

Tab. 1.2: Priamo modulované zdroje – DML (1550 nm) –  $\lambda_w \sim 0,5 \text{ nm}$  [14].

Prenosová rýchlosť [Gbit/s] 17 ps/(nm·km)	G.652 [km]	NZDF [km] 4,4 ps/(nm·km)
2,5	4,7	180
10	11,7	45
40	2,9	11,3

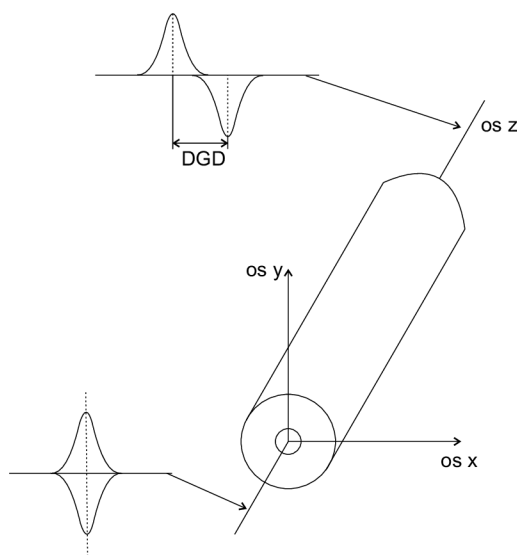
Tab. 1.3: Externe modulované zdroje – EML (1550 nm) –  $\lambda_w \sim 0,024 \text{ nm}$  [2,5 Gbit/s] [14].

Prenosová rýchlosť [Gbit/s] 17 ps/(nm·km)	G.652 [km]	NZDF [km] 4,4 ps/(nm·km)
2,5	980	3780
10	61	240
40	3,8	14,7

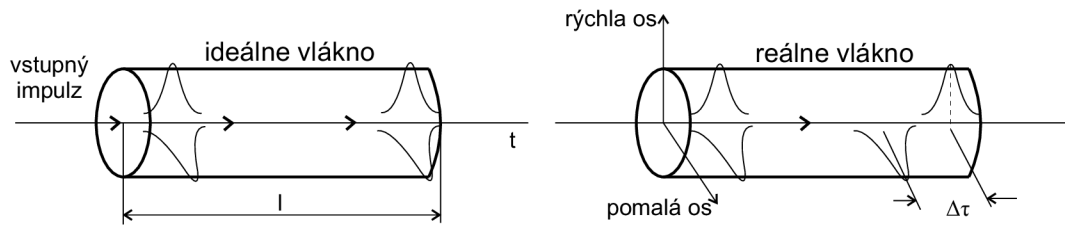
### 1.2.2 Polarizačná vidová disperzia (PMD)

Keďže nárast rýchlosti u jednovidových optických vlákien vzrástol nad 2,5 Gbit/s vznikla potreba merať polarizačnú vidovú disperziu [6]. Polarizačná vidová disperzia je spôsobená anizotropnými vlastnosťami optického vlákna. Index lomu nie je v celom priereze rovnaký, čo spôsobujú niektoré okolité javy ako sú napríklad tlak, teplota, ťah atď. Jednotlivé zložky svetla sa šíria rôznou rýchlosťou a tak vzniká polarizačná vidová disperzia. Je to náhodná veličina, ktorá sa s časom mení. Pri vysokorýchlostných prenosoch predstavuje hlavný problém, ktorý vplýva na prenos

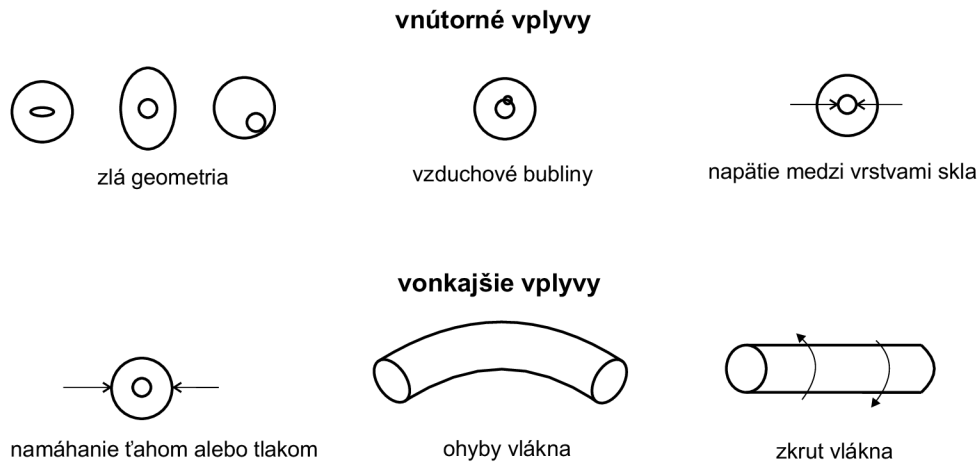
dát. Svetelný signál, ktorý je naviazaný jednovidovým optickým vláknom je šírený v dvoch navzájom kolmých polarizačných rovinách. Signál sa šíri cez dva polarizačné vidy. Ak je os  $z$  smer šírenia vlnenia, potom roviny môžeme označiť ako horizontálne v smere  $x$  a vertikálne v smere  $y$  alebo pomalý a rýchly smer osy. Tento model je zobrazený na obr. 1.11, označovaný aj ako PSP (principal states of polarization). Ak tieto dve zložky zlúčime dostaneme uvažovaný vektor elektrického, respektívne magnetického poľa. Na konci trasy majú polarizačné vidy medzi sebou  $\Delta\tau$ , teda časové oneskorenie niekedy nazývané aj ako DGD (differential group delay). Veľkosť DGD sa mení veľmi pomaly v časovej oblasti, no jeho zmena v závislosti od vlnovej dĺžky je podstatne rýchlejšia. Hodnota polarizačnej vidovej disperzie je vyjadrená v ps. Rozdiel medzi ideálnym a reálnym vláknom je ilustrovaný na obr. 1.12. Impulz prenášajúci informáciu je tvorený obidvoma polarizačnými vidmi, dochádza tým k jeho roztiahovaniu. Keďže sa impulz časovo rozťahuje, dochádza k znižovaniu výkonovej špičky signálu a tým sa zhoršuje odstup signál šum (SNR – signal-to-noise ratio), kedy môže dojsť k medzisymbolovej interferencii (roztiahnutie impulzu do susedných bitových medzier). Obidva mechanizmy zvyšujú chybovosť a zabraňujú prenosu signálu maximálnou rýchlosťou. Príčinou polarizačnej vidovej disperzie je najmä pozdĺžna kruhová nesymetria vlákna a materiálovej nehomogenite hovoríme, že vo vlákne je prítomný dvojlom [15]. Parametre ovplyvňujúce polarizačnú vidovú disperziu sú zobrazené na obr. 1.13.



Obr. 1.11: Oneskorenie DGD svetelného impulzu medzi rýchlou a pomalou osou [15].



Obr. 1.12: Rozdiel medzi ideálnym a reálnym vláknom pri PMD [14].



Obr. 1.13: Vplyvy na PMD [14].

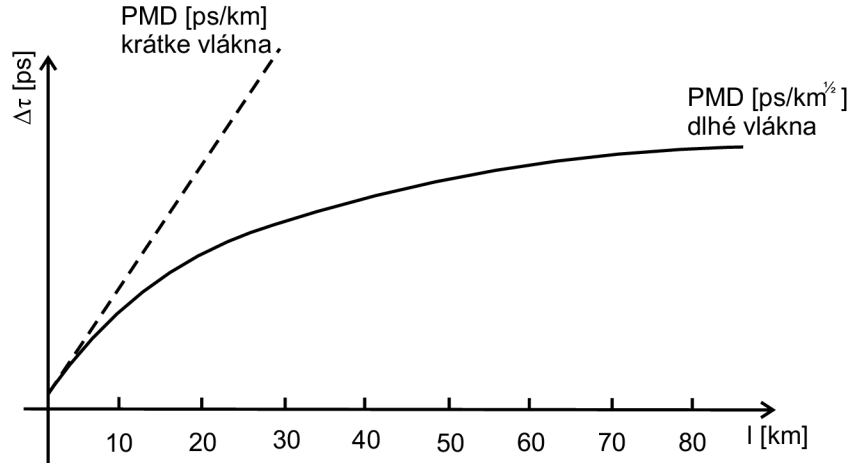
Medzi ďalšie faktory ovplyvňujúce parameter polarizačnej vidovej disperzie sú kvalita montáže trasy a vplyv okolitého prostredia, najmä teplotnej zmeny pri sezónnom zahrievaní a ochladzovaní optického vlákna. Vlastná asymetria vlákna je konštantná, zatiaľ čo mechanické namáhanie sa môže líšiť pozdĺž celej trasy. Mechanické namáhanie môže mať rôzny zdroj. Tieto faktory ovplyvňujú polarizačnú vidovú disperziu náhodným spôsobom a tým ťažšie sa táto metóda kompenzuje. Musíme k nej pristupovať ako k náhodnému javu, pretože jej hodnota sa nedá presne stanoviť výpočtom ako u chromatickej disperzii. Parameter DGD alebo  $\Delta\tau$  patria k základnému merítku polarizačnej vidovej disperzie a meria sa v ps [15]. Polarizačná vidová disperzia je na krátkych vzdialenostiach (do 10 km) takmer lineárna a je vyjadrená ako :

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l} \quad (\text{ps}/\sqrt{\text{km}}), \quad (1.23)$$

pričom  $PMD$  je polarizačná vidová disperzia,  $\Delta\tau$  je diferenciálne skupinové oneskorenie a  $l$  je dĺžka optického vlákna. Na dlhé vzdialenosti sa šíri polarizačná vidová disperzia s druhou odmocninou vzdialenosti :

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} \quad (\text{ps}/\sqrt{\text{km}}), \quad (1.24)$$

kde  $PMD$  je polarizačná vidová disperzia,  $\Delta\tau$  je diferenciálne skupinové oneskorenie a  $\sqrt{l}$  je druhá odmocnina s dĺžky optického kábla. Závislosť  $PMD$  na dĺžke vlákna je zobrazená na obr. 1.14. Limitné hodnoty pre  $PMD$  podľa ITU-T G.697 sú v tab. 1.4 [16].



Obr. 1.14: Závislosť  $PMD$  na dĺžke vlákna [16].

Tab. 1.4: Limitné hodnoty  $PMD$  podľa ITU-T G.697 [6].

Prenosová rýchlosť [Gbit/s]	0,155	0,622	2,5	10	40
SDH	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64	STM-256
Trvanie 1 bitu [ps]	6430	1610	401,88	100,47	25,12
Limit $PMD$ [ps]	640	160	40	10	2,5
Limit $PMD$ deklarácie 1/10 [ps]	643	161	40,10	10	2,51
$PMD_{koef.}$ na 400km [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	> 32	> 8	> 2	> 0,5	< 0,125

Na obr. 1.15 je porovnanie chromatickej disperzie a polarizačnej vidovej disperzie bežného vlákna. Chromatická disperzia je naznačená tenkou čiarou a polarizačná vidová disperzia je naznačená hrubou čiarou. Pre polarizačnú vidovú disperziu platí:

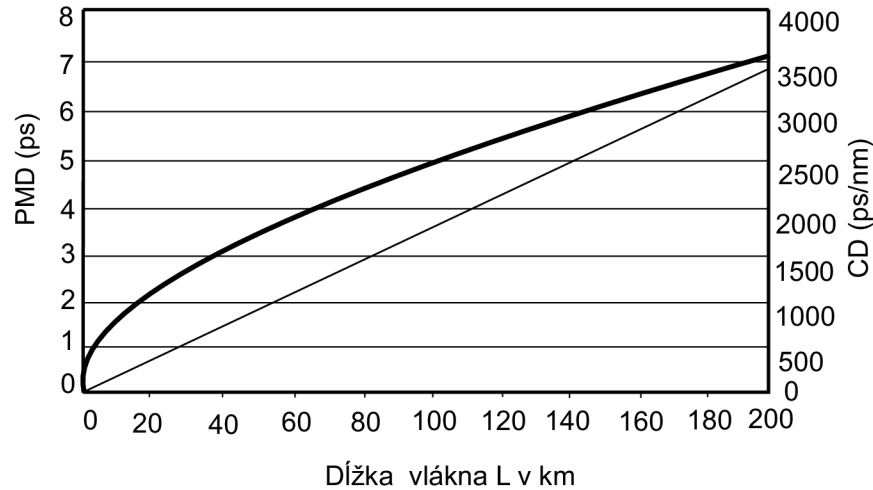
$$PMD_{TOTAL} = PMD_{KOEf} \cdot \sqrt{L} \quad [\text{ps}/\sqrt{\text{km}}], \quad (1.25)$$

a pre chromatickú disperziu platí:

$$CD_{TOTAL} = CD_{KOEf} \cdot L \quad [\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}], \quad (1.26)$$

kde  $PMD_{TOTAL}$  je polarizačná vidová disperzia (totálna),  $PMD_{KOEf}$  je koeficient polarizačnej vidovej disperzie,  $L$  je dĺžka optického vlákna,  $CD_{TOTAL}$  je chromatická

disperzia (totálna) a  $CD_{\text{KOEf}}$  je koeficient chromatickej disperzie. Ako je z grafu zrejme, výsledná chromatická disperzia má čisto lineárny priebeh oproti polarizačnej vidovej disperzii, ktorá rastie s dĺžkou vlákna [19].



Obr. 1.15: CD a PMD bežného vlákna [19].

## 1.3 Disperzie v mnohovidových vláknach

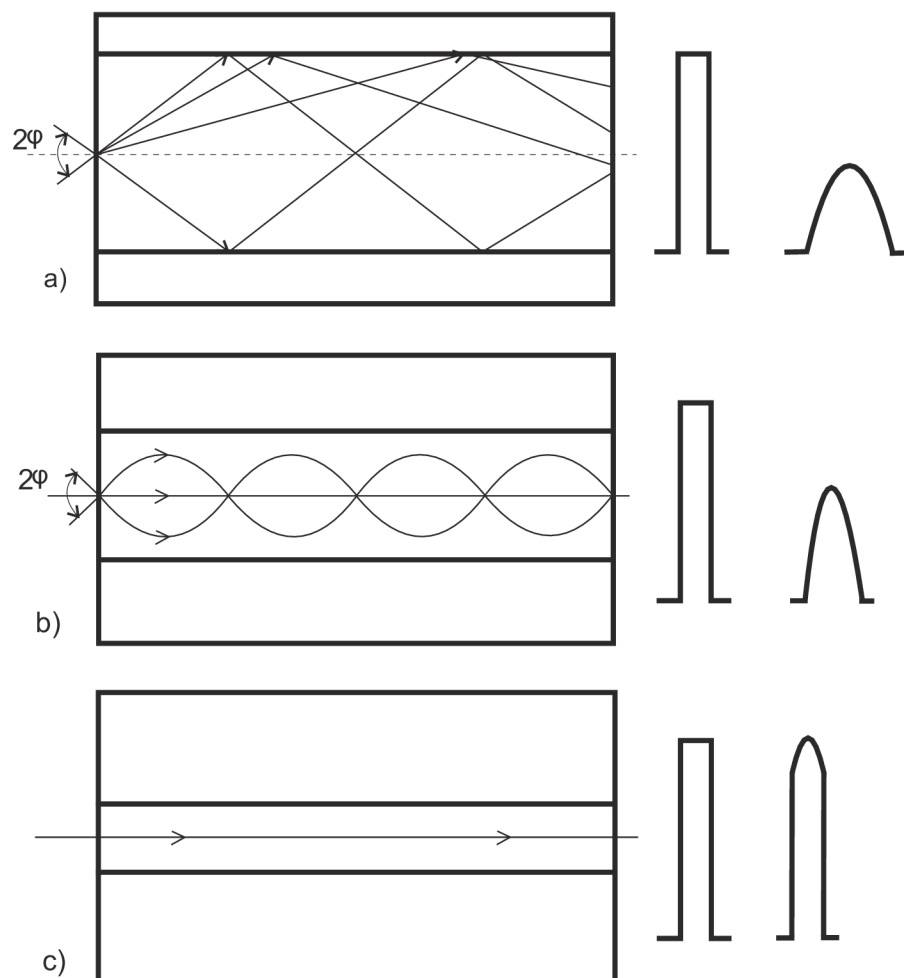
### 1.3.1 Vidová Disperzia

Vidová disperzia nastáva vtedy ak sú prenosové charakteristiky jednotlivých vidov v mnohovidovom vlákne rozličné. Vzniká aj vtedy, keď generátor generuje optické žiarenie so šírkou pásma, ktoré sa blíži k nule [1]. Vlnovodová disperzia obmedzuje šírku prenášaného pásma v mnohovidových vláknach, ktoré majú homogénne jadro. Čím vyšší je vid, tým dlhšia je dráha medzi vstupom a výstupom svetlovodu a jeho rýchlosť v pozdĺžnom smere osi svetlovodu je menšia. Preto vyššie vidy, ktoré sa blížia k svojej hraničnej frekvencii, sa šíria pomalšie než vidy nižšie. Časový rozstup od začiatku svetlovodu medzi jednotlivými vidmi bude daný ich rozdielom skupinových oneskorení [6]. Čím väčší počet vidov v optickom vlákne prenášame, tým rastie vidová disperzia [1]. Pre vidy šíriace sa v osi svetlovodu a pre vid, ktorého trajektória zvierá s osou uhol platí:

$$\Delta t_{\text{vid}} = \frac{t_s}{\cos \vartheta} - t_s = t_s \cdot \left( \frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = t_s \cdot \Delta = \frac{n_s}{c_0} \cdot \Delta \quad [\text{s}], \quad (1.27)$$

pričom  $\Delta t_{\text{vid}}$  značí časovú oblasť pre vid,  $t_s$  je skupinové oneskorenie,  $\cos \vartheta$  je kosínus uhlu vychýlenia,  $n_1$  je index lomu jadra,  $n_2$  je index lomu plášťa,  $n_s$  je skupinový index lomu,  $\Delta$  rozdiel indexu lomu jadra a plášťa a  $c_0$  je rýchlosť svetla vo vákuu.

Typická hodnota pre mnohovidové vlákno so skokovým indexom lomu je 20 ns/km, takže pásmo je schopné prenášať až do desiatok MHz.km. Gradientné vlákna majú 50 ps/km so šírkou pásma niekoľko jednotiek GHz.km a jednovidové vlákna majú šírku pásma približne do 200 GHz.km, pretože prítomnosť disperzie je takmer nulová. Priebeh vstupného a výstupného impulzu pri priechode tromi základnými typmi vlákien je zobrazený na obr. 1.16 [6].



Obr. 1.16: Šírenie impulzu svetlovodom a) mnohovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu b) mnohovidové gradientné vlákno c) jednovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu [6].

## 2 KOMPENZÁCIA CD A PMD

Ako je známe zo slova kompenzácia ide o vyváženie v tomto prípade vyváženie disperzie v optickom vlákne aby mala čo najmenší vplyv na prenášaný pulz. Chromatická disperzia ako bolo vyššie spomenuté je javom nenáhodným, takže pomocou výpočtov sa dá určiť a môžeme jej predísť. V prípade polarizačnej vidovej disperzie ide o opačný prípad, kedy je ťažké jej predísť hlavne vo WDM (wavelength division multiplex) systémoch, keďže je to úplne náhodný jav. Bližšie sa o tomto dozvieme v nasledujúcej kapitole.

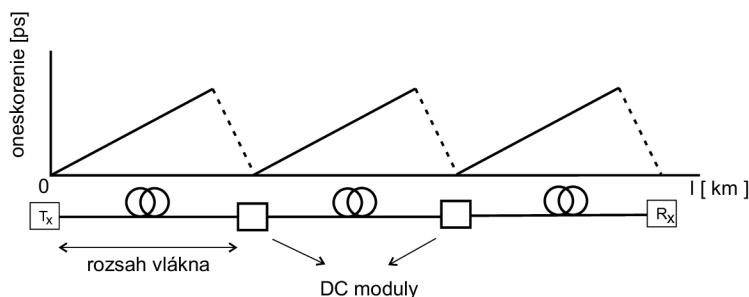
### 2.1 Kompenzácia chromatickej disperzie

#### 2.1.1 DCF kompenzácia

Chromatickú disperziu spôsobuje vo vlákne šíriaci sa rozširujúci pulz, ktorý degraduje kvalitu, obmedzuje vzdialenosť a digitálny signál môže cestovať pred potrebnou obnovou alebo kompenzáciou. Pre hustý vlnový multiplex, teda DWDM (dense wavelength division multiplex) systémy sa pomocou DFB (distributed feedback laser) laserov vypočíta maximálna dĺžka väzby pred ovplyvnením chromatickej disperzie podľa rovnice:

$$l = \frac{104,000}{CD \cdot B^2} \quad [\text{km}], \quad (2.1)$$

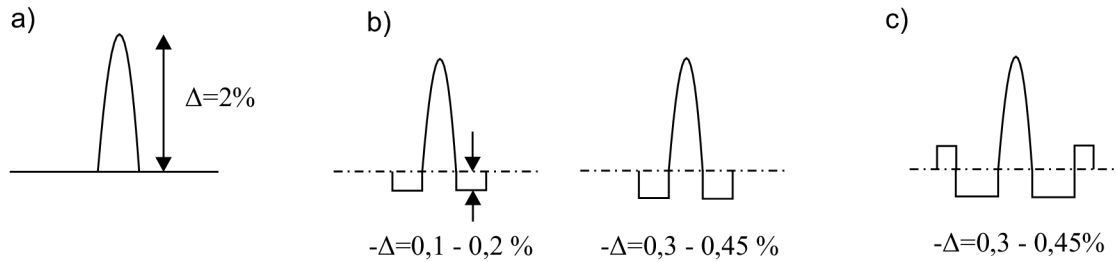
kde  $l$  je vzdialenosť v kilometroch,  $CD$  je chromatická disperzia v ps/(nm·km) a  $B$  je prenosová rýchlosť v Gbit/s. Našťastie chromatická disperzia je pomerne stabilná, predvídateľná a kontrolovateľná. DCF (dispersion-compensating fiber) vlákna majú veľký záporný koeficient chromatickej disperzie preto môžu byť vložené do spoja v pravidelných intervaloch aby sa minimalizovala globálna chromatická disperzia [10]. Celý princíp je založený na zapojení cievky tohoto vlákna na koniec trasy (asi 1,6 skutočnej dĺžky). Týmto sa vykompenzuje hodnota disperzie [6]. Ilustrované je to na obr. 2.1. Profily DCF vlákien sú na obr. 2.2. Profil na schéme a) je nevýhodný



Obr. 2.1: Kompenzačná schéma chromatickej disperzie [10].



pre kompenzáciu disperzií v DWDM systémoch v širokom pásme, lebo má kladný disperzný sklon ako vlastné vlákno, takže celková disperzia mimo jeden kompenzačný bod sa smerom k vyšším vlnovým dĺžkam zväčšuje, b) profily majú negatívny sklon disperzie a hodia sa na kompenzovanie širokopásmových DWDM systémov, c) profily sú vhodné pre vyššie výkony kvôli väčšiemu  $A_{\text{eff}}$  (effective area) preto môžeme do nich naviazať veľké výkony bez toho aby vznikali nelineárne produkty [16].



Obr. 2.2: DCF profily vlákien [16]

Medzi výhody DCF vlákien patrí, že sú ako pasívne kompenzátory a v praxi sú odskúšané [16]. Majú jednoduchú konštrukciu, sú vysoko spoľahlivé a poskytujú kontinuálnu náhradu v širšom rozsahu vlnových dĺžok (tzn. nevyžaduje presné laserové vlnové dĺžky)[20]. Nevýhodou vlákien sú pomerne veľké rozmery, cena, ťažké kompenzovanie disperzného sklonu SMF (single mode fiber) vlákien a vysoký vložný útlm od  $0,38 - 0,5$  dB/km [16].

### 2.1.2 FBG kompenzácia

Ďalším typom kompenzácie je kompenzácia pomocou FBG (fiber bragg grating) vlákien. FBG vlákna obsahujú v určitej oblasti vlákna braggovské mriežky. Braggovské mriežky sú realizované ako periodické zmeny indexu lomu jadra [17]. Zmena indexu sa do vlákna zapisuje pomocou UV (ultraviolet) žiarenia [18]. Tieto mriežky potom pôsobia ako vlnové zrkadlá, ktoré určitú špecifickú vlnovú dĺžku odrážajú a ostatné prepustia [17]. Odrážanie dosahuje 100%. FBG mriežky vplyvom zmeny teploty, namáhania alebo roztahovania spôsobujú zmenu odrážania vlnových dĺžok. Odrážanie závisí na dĺžke mriežky, vlnovej dĺžke svetla, ktoré prechádza vláknom a rozdielu indexu lomov. Rezonančná braggovská vlnová dĺžka je závislá na periodicite mriežky a efektívnom indexe lomu. Tieto dva javy sú ovplyvňované teplotou a zmenami pnutia, teda namáhania a roztahovania. Zmenou pnutia a teploty môžeme meniť aj periodicitu, vďaka čomu sa bude meniť aj hlavná braggovská vlnová dĺžka. Mriežky dosahujú závislostí  $1,2$  pm/ $\mu\epsilon$ .

Pri braggovských mriežkach musí platiť :

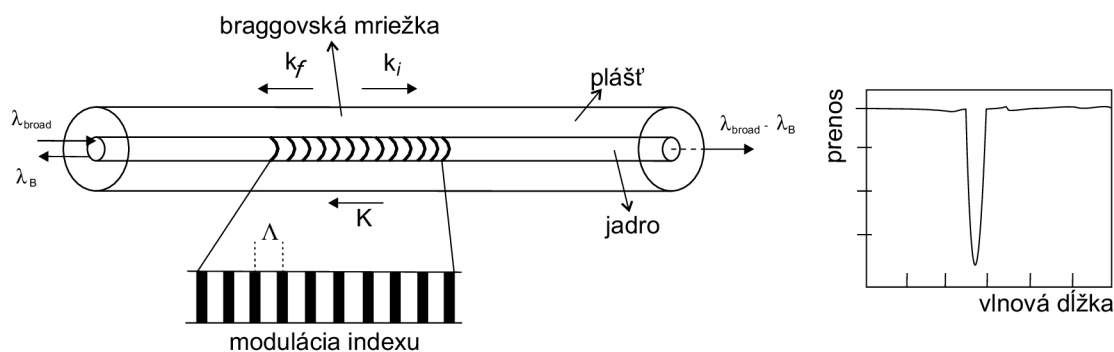
- zákon zachovania energie – frekvencia dopadajúceho žiarenia a odrazeného žiarenia sa rovnajú,
- zákon zachovania hybnosti – súčet vlnového vektoru dopadajúceho svetla a vlnovému vektoru mriežky sa rovná vlnovému vektoru rozptýleného žiarenia  $K + k_i = k_f$ .

Vytváranie mriežky za podmienok, kedy modulovaná zmena indexu je v stave nasýtenia (saturácií), nám spôsobí zmenšenie účinnej dĺžky mriežky a dochádza k poklesu odrážanlivosti. Ak nastane vytvorenie mriežky za týchto podmienok dochádza k rozšíreniu spektra. Jeho šírka závisí na vlnovej dĺžke [18].

Existujú tieto druhy braggovských mriežok :

- uniformné,
- apodizované,
- blazed (naklonené),
- chirped.

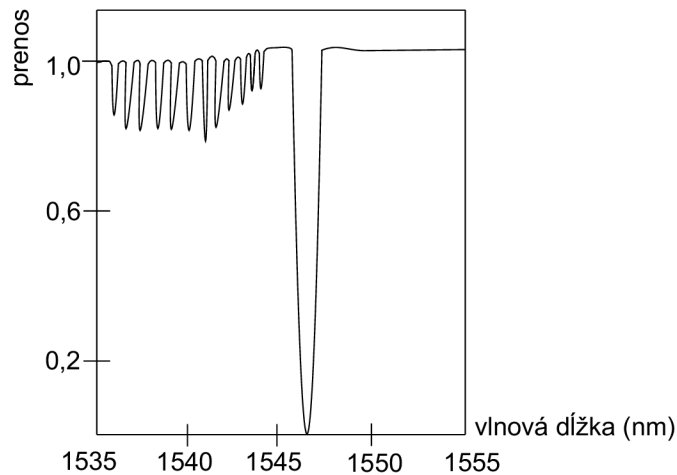
Uniformné mriežky predstavujú základné mriežky, kde zmena indexu lomu a perióda zmien (periodicita) sú konštantné [18]. Tento základ je popísaný vyššie a ilustrované je to na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Uniformná braggovská mriežka s konštantným indexom amplitúdy modulácie a periódy s grafom typického zobrazenia difrakčnej a vektorovej mriežky, ktorá má byť zhodná pre zachovanie hybnosti [17].

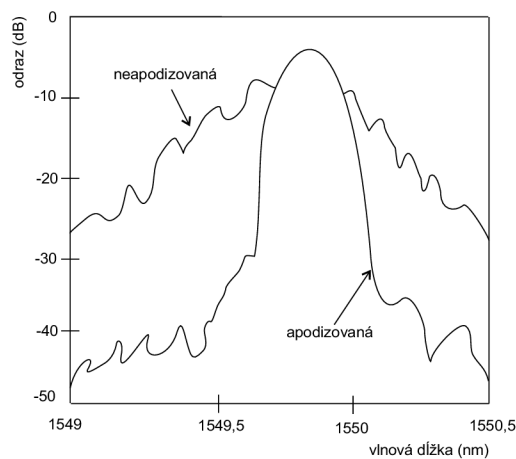
Braggové mriežky vo vysoko fotocitlivom alebo hydrogénovom vlákne majú výrazný štruktúrny prenos na vlnových dĺžkach menších ako je braggovská vlnová dĺžka (obr. 2.4). Táto vlastnosť sa objaví len v prenosovom spektre. V odrazenom svetle sa objaví iba hlavný vrchol vlnovej dĺžky. Táto štruktúra je výsledok svetla odchádzajúceho bočnou stranou vlákna a teda ide o režim vyžarovania mriežky.

Výsledkom uniformných mriežok je spektrum s hlavným vrcholom vlnovej dĺžky, ktoré je sprevádzané niekoľkými oblúkmi po stranách. Tieto oblúky sú spôsobené



Obr. 2.4: Schéma prenosového profilu pre silné optické vlákno braggovskou mriežkou ukazuje stratu žiarenia módov na krátkej strane vlnovej dĺžky, ktorá sa prudko mení v závislosti na spôsobe štruktúry plášťa[17].

odrazmi od protilahlých koncov mriežky. V niektorých prípadoch je dôležité tieto postranné oblúky eliminovať, apodizovať odrazené spektrum. Apodizácia znamená postupné znižovanie zmien indexu lomu na krajoch mriežky. V praxi sa apodizácia dosahuje tým, že sa mení amplitúda zmien indexu lomu na dĺžke mriežky. Najväčšie hodnoty sú v strede a najmenšie po krajoch mriežky. Názorná ilustrácia je na obr. 2.5 [18].

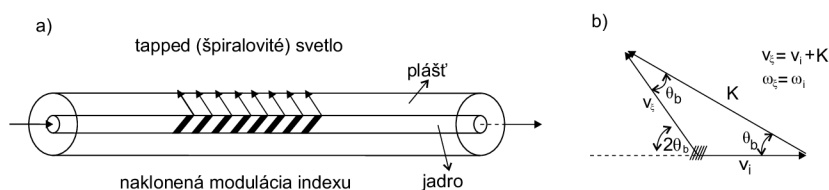


Obr. 2.5: Ukážka apodizovanej a neapodizovanej mriežky [17].

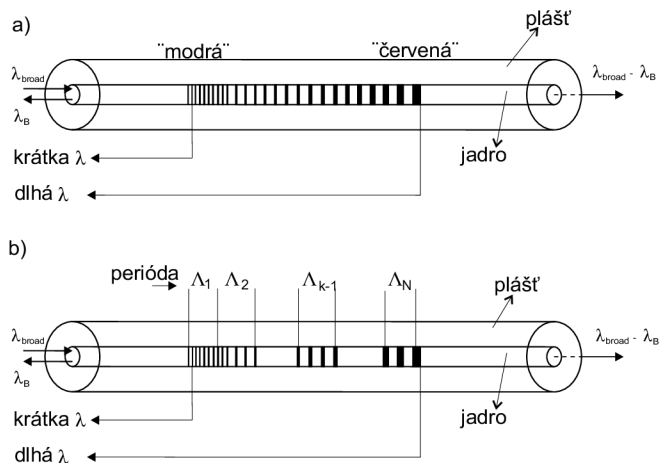
Blazed (naklápajúce) roviny braggovských mriežok v určitom uhle k osi vlákna spôsobujú, že svetlo, ktoré sa šíri inak v jadre bude vyvedené do odrazov, vidov, ktoré sa šíria v plášti alebo vyžiarených vidov. Sklon a silu modulácie indexu určuje

účinnosť väzby a šírku pásma svetla, ktoré je vyžiarené z jadra von (obr. 2.6) [18].

Najčastejšie používané mriežky v telekomunikáciách sú chirped mriežky. U chirped mriežok sa monotónne mení perióda mriežok, to znamená vzdialenosť medzi zmenami indexu lomu. Ilustrované je to na obr. 2.7. Najjednoduchší typ mriežok je taký, kde sa periodičita mení lineárne. Napríklad chirped mriežka môže mať zmenu periódy 1 nm/cm. Mriežka o dĺžke 2 cm bude mať vlnové dĺžky na jednom konci 1550 nm a na druhom konci 1552 nm. Ďalšie FBG mriežky sú napríklad Braggovské mriežky typu I, IIA, II a braggovské mriežky s viac super štruktúrami [18].



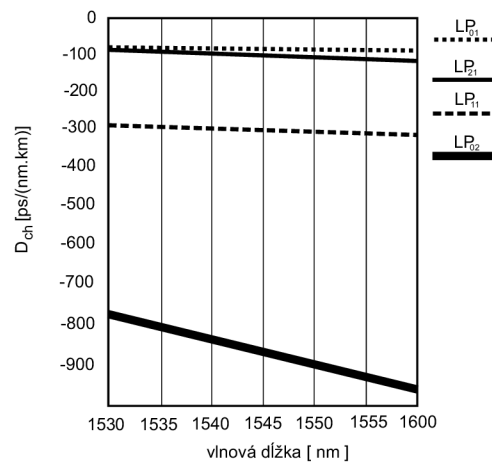
Obr. 2.6: a) schéma naklápajúcej braggovskej mriežky, b) vektorový diagram pre bragg stav naklápajúcej mriežky [17].



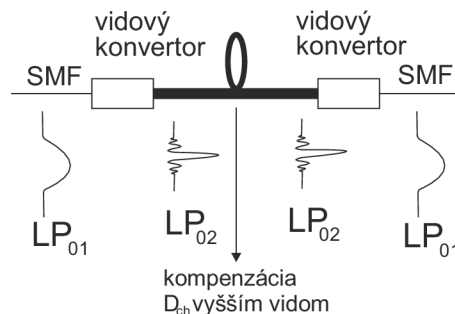
Obr. 2.7: a) schematický diagram chirped mriežky s neperiodickým sklonom. Pre dopredné šírenie svetla ako je ukázané, dlhšie vlnové dĺžky sa šíria ďalej v mriežke ktorá sa odráža b) schematický diagram kaskády z niekoľkých rastúcich periód, ktoré sa používajú na simuláciu dlhých chirped mriežok [17].

### 2.1.3 HOM vláknová kompenzácia

Ďalšími kompenzačnými vláknami sú HOM (higher-order mode) vlákna. Tieto vlákna nám ponúkajú dostatočný záporný sklon disperznej charakteristiky, ktorá sa hodí pre klasické konvenčné vlákna, ale i pre NZDF (non-zero dispersion fiber) vlákna. Koeficient CD u HOM vláknach je približne 3-krát väčší ako u klasických DCF vláknach. Teda oproti iným vláknam pri kompenzačných HOM vláknach stačí použiť iba tretinu dĺžky [21]. Na obr. 2.8 je ukázané, že vyššie vidy majú väčší koeficient chromatickej disperzie, takže sa dajú použiť pre kompenzáciu disperzie. Na obr. 2.9 je ilustrovaná schéma na ktorej vidíme základný vid LP, ktorý je z SMF (single mode fiber) vlákna prevedený cez vidový konvertor na vid LP<sub>02</sub> (má väčšiu D<sub>ch</sub>), keď prejde kompenzáciou sa prevodom vráti na vid LP<sub>02</sub> z tadiaľ cez konvertor opäť na LP<sub>01</sub> vid a ten je pripojený do ďalšieho SMF vlákna.



Obr. 2.8: Graf závislosti chromatickej disperzie na vlnovej dĺžke u HOM optických vlákien [16].



Obr. 2.9: Schéma kompenzácie HOM vlákna[16].

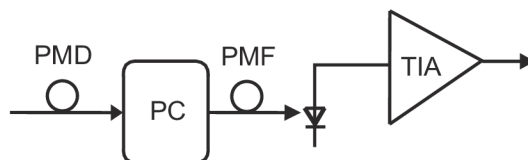
## 2.2 Kompenzácia polarizačnej vidovej disperzie

Keďže je polarizačná vidová disperzia v celku náhodný jav, úplné zníženie tohoto parametru nie je možné, ale určitou korekciou PMD efektu sa dá zmierniť. Môžeme to dosiahnuť kódovaním FEC (forward error correction) alebo redundanciou vlnových dĺžok vo WDM (wavelength division multiplex) sieťach. Celková kompenzácia je riešená nezávisle alebo spolupracuje s inými systémami. Rozdelenie PMD kompenzácií podľa použitých komponentov a ich fyzikálnych a technických vlastností:

- optická kompenzácia,
- optoelektronická kompenzácia,
- elektrická kompenzácia.

### 2.2.1 Optická PMD kompenzácia

Optická PMD kompenzácia vyžaduje polarizačný kontrolér (PC) a dĺžku PMF (polarization maintaining fiber), ktorú využíva k vyrovnaniu polarizácie svetelného signálu a tým vyrovnáva PSPs (principal states of polarization) v PMF. PMF je zámerne dlhé vlákno, ktoré má riadený dvojlom a môže byť použité pre generovanie špecifických veľkostí DGD (differential group delay). Takýmto spôsobom môže byť rýchle SOP (state of polarization) spomaľované rovnako veľkým DGD v PMF, ktoré má za následok celkové zníženie DGD. Náročnejšie kompenzátory môžu byť vyrobené s výmennou pevnou dĺžkou PMF s premenlivým oneskorením, ktoré bude umožňovať zrušenie akýchkoľvek veľkostí DGD alebo viacnásobného PC-PMF stupňa, zvyšujúci stupeň voľnosti a z tohoto dôvodu presnosť kompenzácie[23]. Nevýhodou kompenzácie je, že vyžaduje drahé a objemné optické komponenty. Kompenzátor by mal byť prispôsobivý a mal by reagovať na dynamickú povahu PMD. Tieto požiadavky je obtiažne dosiahnuť, pretože optické komponenty nedosahujú takej ohybnosti a flexibility ako by mali [15]. Schéma takejto kompenzácia je zobrazená na obr. 2.10.

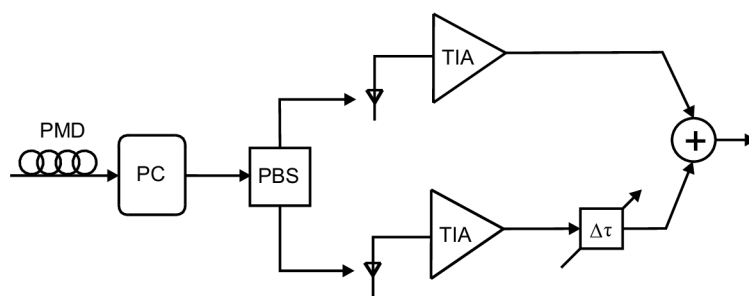


Obr. 2.10: Schéma optického kompenzátora PMD[23].

### 2.2.2 Optoelektronická PMD kompenzácia

Jednou z ďalších možností je použitie optoelektronického kompenzátora PMD, ktorý sa skladá z optickej a elektrickej časti. Schéma na obr. 2.11 sa skladá z rozdeľovaču,

ktorý prijíma svetelný signál z PC a PBS (polarization beam splitter). Výsledné signály sú potom prevedené na elektrické signály dvomi oddelenými TIA (photodiode trans-impedance amplifier). Elektrický signál, ktorý odpovedá svetelnému signálu v rýchlom SOP je potom oneskorený intervalom rovnakých DGD. Nakoniec kompenzácie sú obidva signály spojené do podoby prijímaného signálu, ale už bez PMD. Veľká výhoda tejto kompenzácie je v integrite tzn., že niektorý hardware je premiestniteľný z optickej do elektrickej oblasti. Optoelektronická kompenzácia stále vyžaduje optické komponenty PC a PBS. Väčšiu integráciu dosiahneme použitím elektrického kompenzátora, pretože u optoelektronického je vysoká cena.

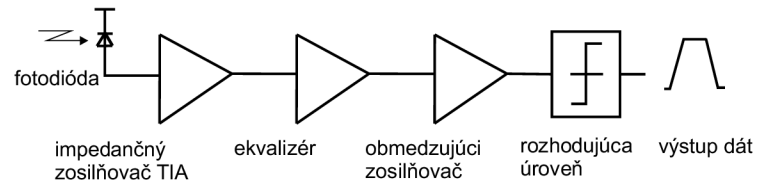


Obr. 2.11: Schéma optoelektronického kompenzátora PMD [15].

### 2.2.3 Elektrická PMD kompenzácia

Spočíva vo vyrovnávaní prijímaného signálu, ktorý je potom prevedený zo svetla na elektrinu pomocou fotodiódy a TIA. Táto kompenzácia je výhodná, pretože ponúka vyššiu úroveň integrácie, vďaka čomu je aj nižšia cena oproti optickej alebo optoelektronickej kompenzácií. Vyššia integrácia je dôležitá pre WDM systémy v ktorých je kompenzácia PMD požadovaná na každý kanál. Prispôbenie k zmenám PMD je jednoduchšie a zo zavedením učiaceho sa algoritmu LMS (least mean squares) aj rýchle dostupné. Elektrickú kompenzáciu môžeme kompenzovať niekoľkými spôsobmi a to: transverzálnym filtrom (TF), nelineárnym spätnoväzobným kompenzátorom (DFE), rozdielovou fázovou detekciou, atď. Tieto kompenzácie sú pomerne veľké a dokážu zlepšiť signál. Na druhej strane to nekompensujú tak dobre ako optická kompenzácia a požadujú vysokorýchlostnú elektroniku aby sa dosiahol lepší výkon. Schéma je zobrazená na obr. 2.12.

Medzi ďalšie kompenzačné možnosti bez pridania kompenzačných častí sú: použitie inej vlnovej dĺžky, použitie iného vlákna optického káblu, výmena celej optickej trasy alebo výmena úseku vlákna [23].



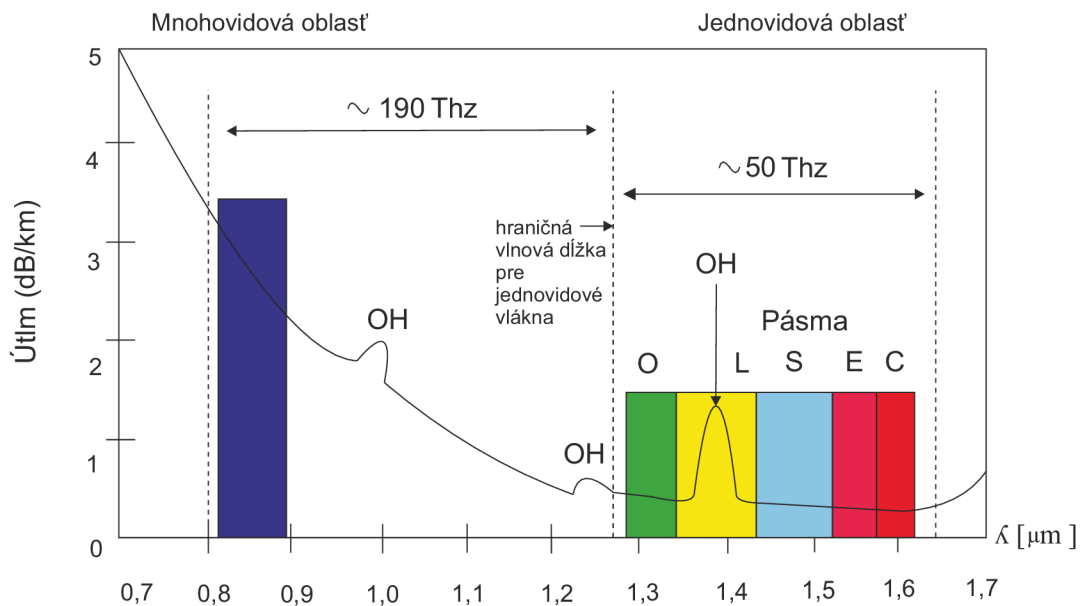
Obr. 2.12: Schéma elektrického kompenzátora[23].



### 3 VLÁKNA

Optické vlákno je sklenené alebo plastové vlákno, ktoré za pomoci svetla prenáša signály v smere svojej pozdĺžnej osi s využitím princípu totálneho odrazu na rozhraní dvoch prostredí s rozdielnym indexom lomu. Optické vlákna sú všeobecne využívané v komunikáciách, vďaka tomu, že umožňujú prenos na dlhšie vzdialenosti a pri vysokých prenosových rýchlostiach dát ako iné druhy komunikácie. Vlákna disponujú menšou stratovosťou oproti ostatným a zároveň sú imúnne voči elektromagnetickým rušeniam. Vnútrná časť vlákna sa volá jadro. Okolo jadra je plášť a primárna ochrana. Jadro musí mať vyšší index lomu než plášť. Vlákna sa delia na jednovidové a mnohovidové. V dátových sieťach sa používajú jednovidové i mnohovidové vlákna s priemerom 50/125  $\mu\text{m}$  (ITU-T G.651) alebo 62,5/125  $\mu\text{m}$  (USA). Pre telekomunikácie sú dnes výhradne používané jednovidové vlákna s priemerom 9/125  $\mu\text{m}$ . Jedná sa o štandardy G.652, G.653, G.655, G.656 a G.657. Viac o štandardoch v nasledujúcej kapitole [24].

Útlmová charakteristika optického vlákna s vyznačením pásiem jednotlivých vlnových dĺžok (obr. 3.1).



Obr. 3.1: Útlmová charakteristika [14].

Na obr.3.2 je útlmová charakteristika už s elimináciou OH na vlnovej dĺžke 1380 nm. Pás 1. (850 nm) spadá pre šírenie po mnohovidových vláknach. Útlmová charakteristika je na tomto mieste silne klesajúca. Hodnoty dosiahnuté pre meraný útlm s využitím pre prenos v diaľkových prenosoch sú príliš vysoké, preto sa používajú vďaka veľmi lacným zdrojom žiarenia na prenos v prístupových optických

sieťach. Pás 2. (1280–1335 nm) je prvý pás, ktorý plne využíva prenos po jednovidových vláknach s priemerom 9/125 $\mu\text{m}$ . Typická hodnota merného útlmu je tesne pod 0,35 dB/km. Využíva sa na diaľkové prenosy. Pás 3. (1530–1565 nm) pre tento pás je typické kremenné vlákno v ktorom sa nachádza minimum útlmu, typicky v hodnotách 0,19–0,22 dB/km. Využíva sa pre diaľkové prenosy transportných a globálnych sietí. Pás 4. (1565–1625 nm) sa nachádza už za absolútnym minimum meraného útlmu a jeho útlmové parametre sa od pásu 3. líšia minimálne. Pokrok v technike WDM (wavelength division multiplex) a optických zosilňovačov dovoľuje pri diaľkovom prenose pri spojení 3. a 4. pásu skoro zdvojnásobiť prenosovú kapacitu. Pás 5. (1355–1530 nm) pre prenosy je dostupný od konca 90. rokov, kedy boli zvládnuté techniky výroby optického vlákna natoľko, že eliminujú prímеси OH tak, že lokálne maximum útlmu sa stráca na 1380 nm. Spojením 2.–5. pásu vytvoríme súvislý prenosový kanál o šírke 50 THz.

Podľa doporučenia ITU-T sa jednovidové vlákna rozdeľujú na :

**G.652 A, B, C a D** – konvenčné vlákna (non-DSF)

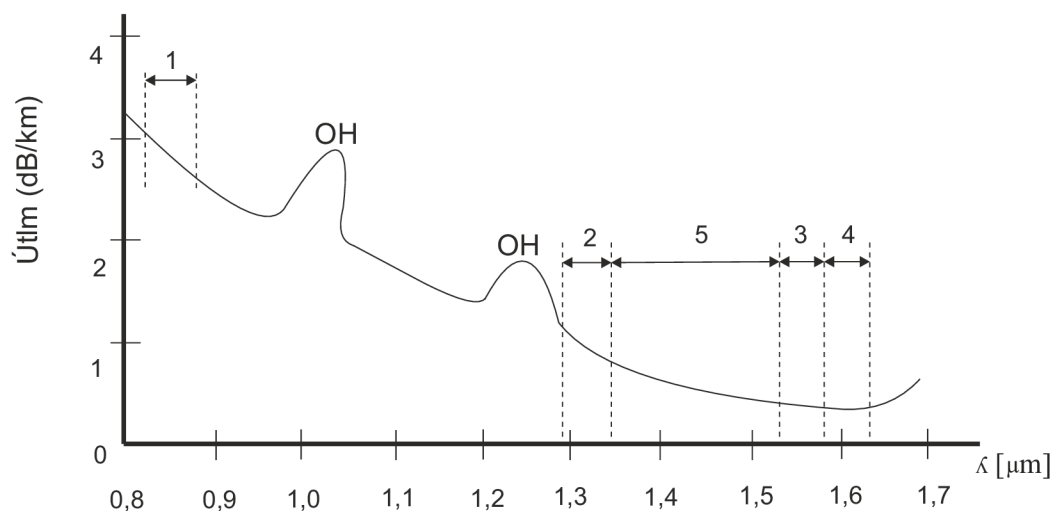
**G.653 A a B** – vlákna s posunutou disperziou (DSF)

**G.654 A, B a C** – vlákna s posunutou medznou vlnovou dĺžkou (CSF)

**G.655 A, B, C, D a E** – vlákna s posunutou nenulovou disperziou (NZ-DSF)

**G.656** – vlákna s posunutou nenulovou disperziou pre širokopásmový optický prenos (NZ-DSF)

**G.657 A a B** – vlákna menej citlivé na ohyby pre prístupové siete [14].



Obr. 3.2: Útlmová charakteristika optického vlákna [6].

Tab. 3.1: Jednotlivé pásma vlnových optických dĺžok jednoividových vlákien [6].

Pásma	Názov	Rozsah [nm]
O	Original	1260 – 1360
O	Extended	1360 – 1460
S	Short	1460 – 1530
C	Conventional	1530 – 1565
L	Long	1565 – 1625
U	Ultra-long	1625 – 1675

### 3.1 G.652 A, B, C a D

Prvé jednoividové vlákna boli uvedené odporúčaním ITU-T G.652. Štandard bol vytvorený v roku 1984 preto sa vlákna nazývajú aj ako štandardné alebo konvenčné [25]. V praxi sa stretne aj s označením MC (matched cladding) [6]. Vlákna boli nasadzované v širokom spektre do verejných sietí a predstavujú tak väčšinu vlákien, ktoré boli nainštalované. Sú kľúčovým základom pre modernú optickú sieť. Nulová disperzia je okolo 1310 nm, čo ich predurčuje k použitiu v tejto oblasti [25]. Kategória C sa od A a B líši len v použití a to v celom rozsahu vlnových dĺžok [6]. Kategória D v praxi známa pod označením FLEX ZWP (zero water peak) má nulový obsah hydroxidových iontov [31]. Parametre vlákien sú porovnané v tab. 3.2.

Tab. 3.2: Norma ITU-T G.652 A, B, C a D – konvenčné vlákna [14].

Parameter	G.652.A	G.652.B	G.652.C	G.652.D	AllWave
MFD – 1310 nm [m]	8,6 – 9,5	8,6 – 9,5	8,6 – 9,5	8,6 – 9,5	8,8 – 9,6
Medzná vlnová dĺžka [nm]	1260	1260	1260	1260	1260
Koeficient útlmu 1500 nm [dB/km]	0,4	0,35	0,3	0,3	0,25
Koeficient útlmu 1383 nm [dB/km]	~	~	0,4	0,4	0,31
Nulová chromatická disperzia [ nm ]	1300 – 1324	1300 – 1324	1300 – 1324	1300 – 1324	1302 – 1322
Sklon disperznej charakteristiky	0,092	0,092	0,092	0,092	0,09
PMD [ps√km]	0,5	0,2	0,5	0,2	0,06

## 3.2 G.653 A a B

Toto vlákno je optimalizované pre použitie pre vlnové dĺžky 1550 nm, ale dajú sa použiť aj pre 1310 nm, no s výhradou obmedzení v odporúčaniach. Nulová disperzia týchto vlákien je okolo 1550 nm a disperzný koeficient rastie s vlnovou dĺžkou. Je určené do jednokanálových systémov s vysokými prenosovými rýchlosťami na dlhé vzdialenosti s posunutím nulovej disperzie okolo 1550 nm [25]. V praxi sa označujú ako DSF (dispersion shifted fiber) a boli vyvinuté pre potlačenie CD pre vlnovú dĺžku 1550 nm. Kategória A má nulovú disperziu v rozsahu 1525 – 1575 nm, čo je výhodné pre jednokanálové systémy, ale naopak jej nelineárnymi účinkami v oblasti 1550 nm sú škodlivé v DWDM systémoch. Používa sa pre viackanálové systémy s rovnakým kanálovým rozstupom v rozsahu vlnových dĺžok 1565 – 1625 nm, kde má CD nenulové hodnoty (ITU-T G.698.1 a ITU-T G.698.2). Kategória B má podobné vlastnosti ako A kategória, ale s prísnejšou požiadavkou na PMD. Požiadavka umožňuje prenos v systémoch STM-64 do dĺžky väčšej ako 400 km a aplikáciu v systémoch ITU-T G.959.1 NRZ 40G [25]. Výhodné je použitie oboch kategórii pre vysokorýchlostné systémy na dlhé vzdialenosti s jedinou vlnovou dĺžkou. Pre DWDM systém s viacerými vlnovými dĺžkami dochádza k vedľajším efektom[6]. Parametre vlákien sú porovnané v tab. 3.3.

Tab. 3.3: Norma ITU-T G.653 A a B – vlákna s posunutou disperziou [14].

### Pracovná dĺžka 1550 nm

Parameter	G.653.A	G.653.B
MFD – 1550 nm [ $\mu\text{m}$ ]	7,8 – 8,5	7,8 – 8,5
Medzná vlnová dĺžka [nm]	1270	1270
Koef. útlmu 1550 nm [dB/km]	0,35	0,35
Koef. útlmu 1383 nm [dB/km]	~	~
Nulová CD [nm]	1500 – 1600	
Sklon disperznej charakteristiky [ $\text{ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$ ]	0,085	0,085
$D_{\text{max}} - 3,5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$	1525 – 1575	1525 – 1575
$D_{\text{min}}$ a $D_{\text{max}}$ (1460 – 1625 nm)		-9 – +7,75
PMD [ $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ ]	0,5	0,2

## 3.3 G.654 A, B a C

Hlavnými črtami vlákna je jeho dlhšia prerušená vlnová dĺžka a menší odrazový útlm v oblasti 1550 nm oproti ostatným jednovidovým vláknam. Čím dlhšia je prerušená vlnová dĺžka, tým si môže dovoliť nižšie makroohybové straty vo vlákne konštrukcie. Preto je pre vlákna, ktoré sa vkladajú do mora výhodné mať menší útlm. Tieto

hodnoty závisia na výrobnom procese, materiálovom zložení a dizajne kábla. V oblasti 1550 nm by mali byť dosiahnuté hodnoty 0,15–0,19 dB/km [25]. Sú nákladné a ako bolo spomínané používajú sa výhradne k extrémnym diaľkovým prenosom pre podmorské káble bez zosilňovača na trase [6]. Najvhodnejšie pre vlnové dĺžky 1530–1625 nm [25]. Parametre vlákien sú porovnané v tab. 3.4.

Tab. 3.4: Norma ITU-T G.654 A, B a C – vlákna s posunutou medznou vlnovou dĺžkou [14].

#### Pracovná dĺžka 1550 nm

Parameter	G.654.A	G.654.B	G.654.C	AllWave Ocean
MFD – 1550 nm [m]	9,5 – 10,5	9,5 – 10,5	9,5 – 10,5	10,4
Medzná vlnová dĺžka [nm]	1530	1530	1530	1260
Koeficient útlmu 1500 nm [ dB/km]	0,22	0,22	0,22	0,2
Koeficient útlmu 1383 nm [ dB/km]	~	~	~	0,31
Disperzia 1550 nm [ps/nm·km]	20	22	20	16,6
Sklon disperznej charakteristiky [ps/nm <sup>2</sup> ·km]	0,07	0,07	0,07	0,06
PMD [ps√km]	0,5	0,2	0,2	0,02

### 3.4 G.655 C, D a F

Je to jednovidové vlákno s nenulovou posunutou disperziou. Má absolútnu hodnotu disperzného koeficientu vyššiu ako nejakú hodnotu v celom rozsahu vlnových dĺžok 1530–1565 nm. Táto disperzia znižuje rast nelineárnych efektov, ktoré sú obzvlášť škodlivé pre DWDM systémy [25]. Tieto vlákna sa dnes používajú pre diaľkové optické siete a od vlákna G.653 sa líši tým, že nemá nulovú disperziu pre vlnovú dĺžku 1550 nm. Menšia nenulová disperzia je dôležitá k tomu, aby sa tu neprejavovali vedľajšie nelineárne efekty. Tieto vlákna sú určené k prenosu u technológie DWDM a pre vysoké prenosové rýchlosti. Parametre vlákien sú porovnané v tab. 3.5.

Tab. 3.5: Norma ITU-T G.655 C, D a F – vlákna s posunutou nenulovou disperziou [14].

**Pracovná dĺžka 1550 nm – pásmo C a od špecifikácie D a tiež L**

Parameter	G.655.A	G.655.B	G.655.C	G.655.D	G.655.E
MFD – 1550 nm [m]	8 – 11	8 – 11	8 – 11	8 – 11	8 – 11
Medzná vlnová dĺžka [nm]	1450	1450	1450	1450	1450
Koeficient útlmu 1500 nm [dB/km]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Koeficient útlmu 1383 nm [dB/km]	~	~	~	~	~
Disperzia 1530 – 1560 nm [ps/nm·km]	0,1 – 6	1 – 10	1 – 10		
Disperzia 1460 nm [ps/nm·km]				-4,2 – 3,29	0,64 – 4,66
Disperzia 1625 nm [ps/nm·km]				5,77 – 11,26	9,36 – 13,43
PMD [ps√km]	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2

### 3.5 G.656

Má absolútnu hodnotu disperzného koeficientu vyššiu ako nejakú hodnotu v celom rozsahu vlnových dĺžok 1460 – 1625 nm. Tieto vlákna môžu byť využité pre CWDM (coarse wavelength division multiplex) a DWDM systémy v celej šírke vlnových dĺžok medzi 1460 – 1625 nm. Koeficient chromatickej disperzie je ohraničený párom kriviek a vlnovej dĺžke v rozmedzí 1460 – 1625 nm [25]. Maximálna chromatická disperzia je od 2 do 14 ps/nm·km a maximálna polarizačná vidová disperzia 0,20 ps√km [6]. Parametre vlákna sú uvedené v tab. 3.6.

Tab. 3.6: Norma ITU-T G.656 – vlákna s posunutou nenulovou disperziou pre širokopásmový optický prenos [14].

**Pracovná dĺžka 1550 nm – pásmo S, C a L**

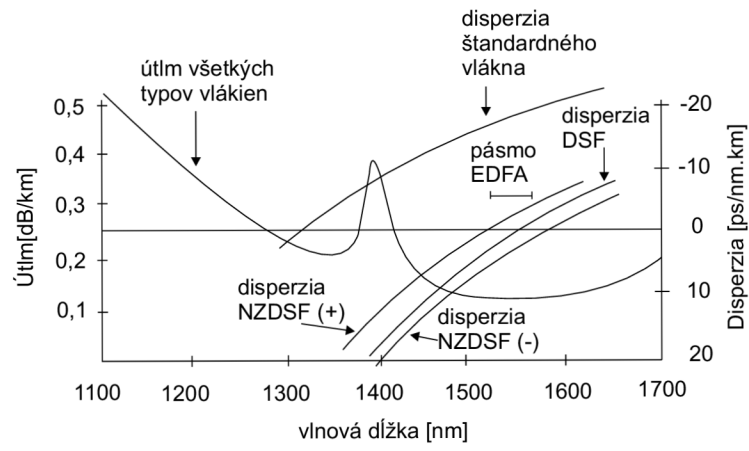
<b>Parameter</b>	<b>G.656</b>	<b>TrueWave REACH</b>
MFD – 1550 nm [ $\mu\text{m}$ ]	7 – 11	8,6
Medzná vlnová dĺžka [nm]	1450	1310
Koef. útlmu 1550 nm [dB/km]	0,35	Max. 0,25
Koef. útlmu 1383 nm [dB/km]	~	Max. 0,4
Disperzia 1460 nm [ps/nm·km]	1 – 4,6	Min. 2
Disperzia 1625 nm [ps/nm ·km]	4,58 – 14	Max. 11,4
PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,2	0,04

### 3.6 G.657 A a B

Globalizácia nasadzovania širokopásmových prístupových sietí súvisí aj s uplatňovaním jednovidových optických vlákien, ktoré zaistujú vysoko kapacitné prenosové médium. Použitie týchto vlákien v prístupových sieťach je vo väčšej miere obmedzené podľa prostredia do akého sú inštalované (manipulácia, citlivosť na ohyb). Tento štandard zastrešuje vlákna, ktoré sú určené práve do takýchto prostredí. Kategória A je podskupinou vlákna G.652.D a má rovnaké prenosové a prepojovacie vlastnosti. Má nižšie straty v ohýbaní a vďaka prísnejšej rozmerovej špecifikácii aj lepšiu konektivitu. Používa sa v prístupových sieťach (vo vnútri budov a na konci týchto sietí). Kategória B sa používa v širokopásmových optických prístupových sieťach. Vlákna sú vhodné na prenos na vlnových dĺžkach 1310, 1550 a 1625 nm za obmedzených vzdialeností [25]. Parametre vlákien sú porovnané v tab.3.7. Na obr.3.3 je porovnanie vlákien G.652, G.653 a G.655.

Tab. 3.7: Norma ITU-T G.657 A a B – vlákna necitlivé na ohyby pre prístupové siete [14].

<b>Parameter</b>	<b>G.657.A</b>	<b>G.657.B</b>
MFD – 1310 nm [ $\mu\text{m}$ ]	8,6 – 9,5 $\mu\text{m}$	6,3 – 9,5 $\mu\text{m}$
Medzná vlnová dĺžka [nm]	G.652.D	G.652.A
Chromatická disperzia	G.652.D	TBD
PMD	G.652.D	TBD



Obr. 3.3: Závislosť merného útlmu na vlnovej dĺžke [26].



## 4 MERANIE DISPERZIÍ

Metódy merania disperzií zaujímajú každého, kto chce mať koncovú informáciu v pôvodnom stave. Slúžia aj k detekovaniu disperzie a jej následnému odstráneniu alebo zmenšeniu vplyvu na prenášaný pulz. Aj napriek tomu, že chromatická disperzia sa dá vypočítať sú tu faktory, ktoré sa musia určiť inak ako výpočtom. Jedným z faktorov je zvyšovanie bitovej rýchlosti. Impulzy, ktoré nesú informáciu sú bližšie na sebe a disperzia tak obmedzuje dosah spoja. U takéhoto spoja potom rastie potreba dôkladnejšej eliminácie alebo kompenzácie chromatickej disperzie. S narastajúcimi prenosovými rýchlosťami stúpa aj premeriavanie doteraz zanedbateľných parametrov napr. teplotná nestabilita hodnoty chromatickej disperzie a kompenzačného prvku a z toho vyplývajúca potreba kompenzácia dynamická. Ďalšou oblasťou môže byť nasadzovanie hustých vlnových multiplexov DWDM, kde sa využíva celé spektrum, nie ako u jednokanálových systémov. Bude nás zaujímať teda chromatická disperzia celého spektra (dnes väčšinou C a L pásma). Princípy merania chromatickej disperzie sú už dlhšie známe a ich uplatnenie záleží na technologickom vývoji a možnostiach [21]. Pri polarizačnej disperzii vyplýva nutnosť premeriavania trás, keďže ako sme spomínali je to jav náhodný. Meranie týchto vlákien sa prevádza od výroby cez káblovanie, záverečné meranie pri uvedení inštalovanej trasy do prevádzky po údržbové merania. Riziko je vyššie hlavne u starších optických trás (90-te roky) a tento problém je nutné často riešiť v prípade ak potrebujeme na stávajúcej staršej optickej trase nainštalovať systém s prenosovou rýchlosťou 10 Gbit/s [15].

### 4.1 Metódy merania chromatickej disperzi

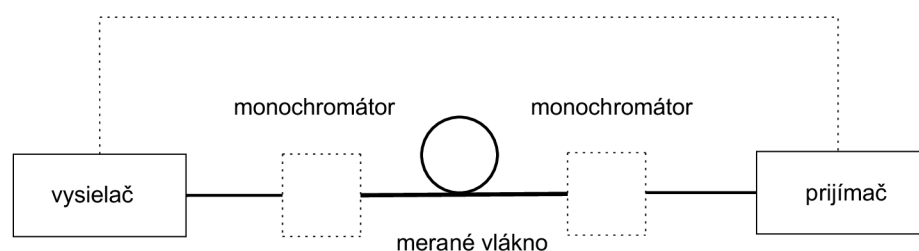
Meranie CD môžeme prostredníctvom týchto metód :

- metóda fázového posunu,
- metóda diferenciálneho fázového posuvu,
- metóda oneskorenia impulzov v časovej oblasti (time of flight),
- metóda interferometrická (nevhodná pre merania optických trás) [27].

#### 4.1.1 Metóda fázového posunu a metóda diferenciálneho fázového posunu

Podľa ITU-T G.650 je uvedená ako referenčná metóda pre meranie chromatickej disperzie. Na meranie sa využíva modulovaný signál, ktorý sa šíri prostredníctvom niekoľkých vlnových dĺžok meraným vláknom optickej trasy. Po prechode trasou je signál detekovaný a pomocou meracieho prístroja pre meranie fázy je následne aj zistená. Táto fáza je porovnávaná s fázou vstupného signálu a z ich porovnania získame zmenu pri prechode signálu trasou z čoho zistíme oneskorenie. Pri tejto

metóde je dôležité použiť tzv. referenčnú trasu (iné vlákno v kábli), pomocou ktorej budeme prenášať informáciu o vstupnej fáze signálu. V praxi sa používa viac metóda diferenciálneho fázového posunu pri ktorej meriame vzájomný rozdiel fáz signálov na rôznych vlnových dĺžkach. Preto pri tejto metóde nemusíme prenášať referenčný signál na detekčnú stranu. V praktických usporiadaniach sa však pri tejto metóde väčšinou používa pre meranie dvoch vlákien, kde je jedno merané a druhé komunikačné. Po komunikačnom vlákne sa prenáša informácia z výstupu na vstup. Obe metódy majú rovnakú blokovú schému merania (obr. 4.1).

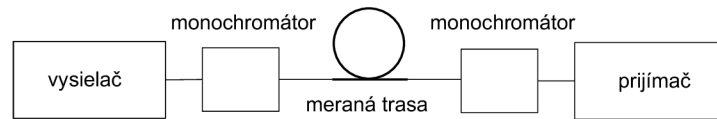


Obr. 4.1: Závislosť merného útlmu na vlnovej dĺžke [27].

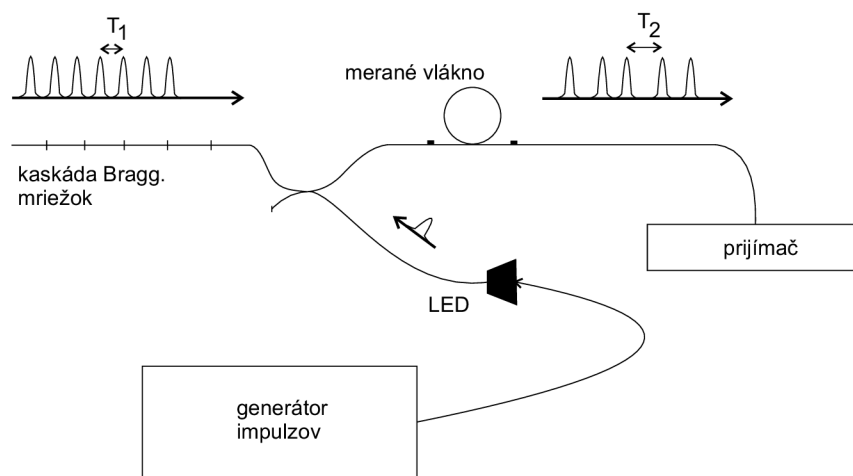
#### 4.1.2 Metóda oneskorenia impulzov v časovej oblasti

Základom tejto metódy je vysielanie optických impulzov za sebou o rôznych vlnových dĺžkach, ale o presných časových rozostupoch do meranej trasy. Z porovnania rozostupov jednotlivých optických impulzov na vstupe a na výstupe meranej trasy sa určí oneskorenie vplyvom chromatickej disperzie. Ako zdroj meracej sústavy je možné využiť skupinu laserových diód či širokospektrálny zdroj, kde sú jednotlivé vlnové dĺžky vybrané pomocou monochromátoru. Rozostup impulzov na vstupe trasy ktorej meriame nám udáva aké najväčšie oneskorenie je možné na tejto trase merať. Ak by bolo oneskorenie väčšie ako je rozostup impulzov, dochádza k zámene poradia impulzov a meranie je teda chybné. Tento jav sa dá odstrániť spektrálnou selektívnou prijímacou sústavou. Schéma je ukázaná na obr. 4.2. Na obr. 4.3 je vidieť konfiguráciu metódy oneskorenia impulzov v časovej oblasti. Led dióda, ktorá je generátor impulzov, moduluje žiarenie širokospektrálneho zdroja. Kaskáda braggovských mriežok slúži ako monochromátor. Kaskáda z prichádzajúceho impulzu odráža späť do meranej trasy zložky o vybraných vlnových dĺžkach s určitými časovými rozostupmi. Je to spôsobené tým, že kaskáda je tvorená odlišnými mriežkami. Medzi týmito mriežkami sa nachádzajú úseky optického vlákna a každá mriežka odráža žiarenie o rôznej vlnovej dĺžke. Preto potom do meraného vlákna prichádzajú rozdielne vlnové dĺžky s danými časovými rozostupmi. Tieto rozostupy sa však zmenia

pri prechode vláknom vplyvom chromatickej disperzie. Nakoniec porovnaním vstupov a výstupov meranej trasy zistíme hodnoty oneskorenia spôsobené chromatickou disperziou [21].



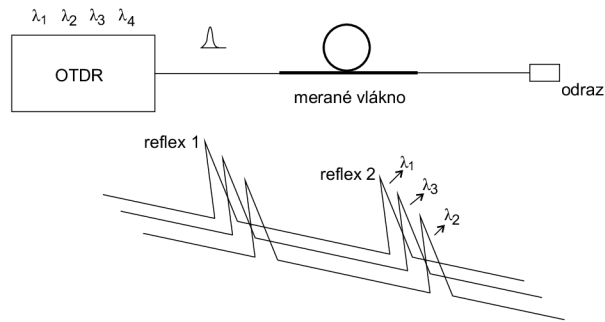
Obr. 4.2: Metóda fázového posunu a diferenciálneho fázového posunu [21].



Obr. 4.3: Metóda oneskorenia impulzov v časovej oblasti [27].

### OTDR – optical time – domain reflectometer

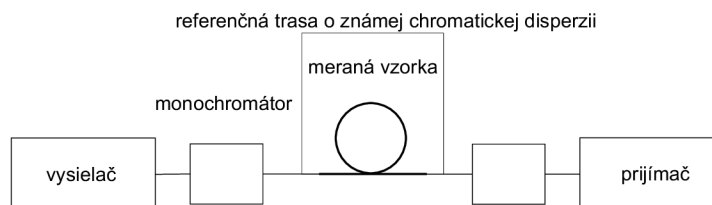
Na obr. 4.4 je ilustrované meranie pomocou metódy OTDR. Je to reflektometrická metóda a meria sa z jednej strany a využíva pritom odraz z druhého konca [11]. Princíp tejto metódy spočíva vo vyslaní svetelného impulzu do vlákna injekčným laserom, buď pomocou smerového väzobného článku alebo väzbovej optiky doplnenej o polopriepustné zrkadlo či iný typ rozdeľovača optického zväzku. Spätne odrazené alebo rozptýlené svetlo z vlákna je detekované lavínovou fotodiódou. Takto detekovaný elektrický signál sa potom vedie do analógového alebo digitálneho integrátora z ktorého je zavedený do logaritmického zosilňovača alebo sa zlogaritmovanie z priemerného signálu pre získanie hodnôt útlmu v dB vykoná digitálne. Výsledok sa zobrazí na displeji. Tým získame prehľad o útlme v závislosti na vzdialenosti [30].



Obr. 4.4: Metóda oneskorenia impulzov v časovej oblasti - OTDR [27].

### 4.1.3 Metóda interferometrická

Z názvu je vidieť, že základom metódy je interferencia. Používa najčastejšie Michelsonovho alebo Mach-Zehnderovho interferometru. Princíp metódy je zobrazený na obr. 4.5. Meraná vzorka jedno rameno Mach-Zehnderovho interferometru a druhé rameno je použité ako referenčná cesta s chromatickou disperziou. Na detekčnej strane dochádza k interferencii signálov z oboch ramien. Ak budeme meniť dĺžku referenčnej cesty, bude sa nám meniť aj vzájomný fázový rozdiel signálov z oboch strán, ktorý môžeme sledovať na interferometri. Ako referenčnú cestu môžeme zvoliť krátke optické vlákno (patchcord) alebo môže byť lúč vedený vzduchom za pomoci optickej sústavy. Táto metóda nie je vhodná na meranie do terénu a používa sa pre presné laboratórne merania krátkych vlákien (do 10 m) alebo meranie súčiastok [21].



Obr. 4.5: Metóda interferometrická [27].

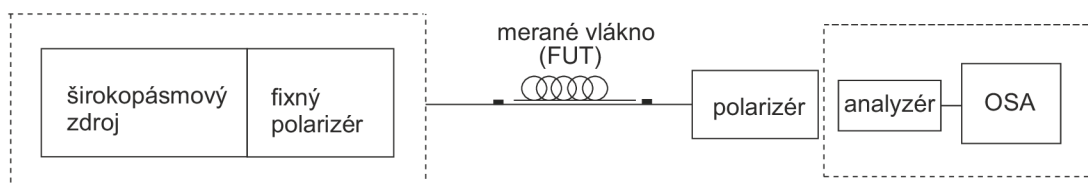
## 4.2 Meranie polarizačnej vidovej disperzie

Metódy merania PMD sú:

- skenovanie vlnovej dĺžky (s fixným analyzátorom),
- polarimetrická metóda (nevhodná pre meranie optických trás),
- TINTY – traditional interferometric method,
- GINTY – generalized interferometric method [28],
- SSA – scrambled state-of-polarization analysis [55].

### 4.2.1 Metóda skenovania vlnovej dĺžky

U tejto metódy sa prevádza spektrálne meranie a to buď pomocou laditeľného laseru (meradlo výkonu), alebo širokopásmovým zdrojom žiarenia (optický spektrálny analyzátor) – BS-OSA [11]. Princíp metódy je založený na jednostrannom monitorovaní závislosti výkonu, ktorý prechádza optickou trasou na vlnovej dĺžke [12]. Jedná sa o jednostranné meranie pri ktorom sa zisťuje spektrálna zmena polarizácie. PMD parameter sa stanoví buď spočítaním extrémov alebo použitím rýchlej Fourierovej transformácie (FFT). Na obr. 4.6 je schéma so širokopásmovým analyzátorom OSA [11].

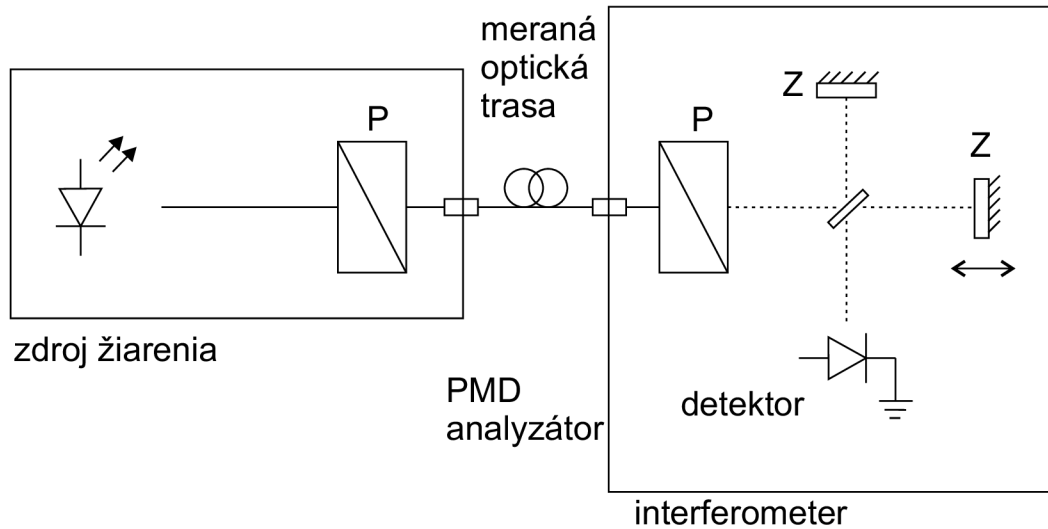


Obr. 4.6: Metóda skenovania vlnovej dĺžky [11].

### 4.2.2 TINTY

Metóda je založená na interferenciách nízko koherentného optického žiarenia. Toto nízko koherentné žiarenie vznikne zo širokospektrálneho zdroja žiarenia, LED (light-emitting diode) dióda. Polarizované výstupné žiarenie zdroja sa po priechode P polarizátorom naviaže do vlákna trasy na jej druhom konci PMD analyzátoru. Jadrom PMD analyzátoru je Michelsonov interferometer (najčastejšie). V tomto interferometri je polarizované optické žiarenie rozdelené do dvoch ramien, jedno je zakončené pevným a druhé pohyblivým zrkadlom. Optické žiarenie sa odráža od oboch zrkadiel späť a na detektore potom nastáva interferencia signálov z oboch ramien. Posunom pohyblivého zrkadla sa mení vzájomný časový posun medzi signálmi oboch ramien. Z tohoto posunu získame interferogram z ktorého je zostavené oneskorenie vplyvom polarizačnej vidovej disperzie. Vďaka širokospektrálnemu zdroju žiarenia je výsledkom priameho stanovenia PMD trasy, definovaná ako stredná hodnota oneskorenia (stredná hodnota v spektre). Táto metóda preto nie je vhodná pre meranie trasy z vyššie uvedenými spektrálne závislými prvkami. U dlhej trasy, ktorá obsahuje EDFA (erbium doped fiber amplifier) zosilňovače je teda nutné merať každý zosilňovací úsek zvlášť a celkovú hodnotu PMD trasy počítať. Prítomnosť autokorelačnej špičky vo výslednom interferograme ďalej znižuje presnosť merania. Najviac sa to prejavuje pri meraní nízkych hodnôt PMD. Chyba merania môže byť až niekoľko desiatok percent. Z dôvodu prítomnosti autokorelácie sa nedá PMD vyhodnocovať priamo z interferogramu, preto sa musí preložiť Gaussovou krivkou. Toto preloženie

sa prejavuje v znížení presnosti merania, lebo preloženie Gaussovou krivkou úplne odpovedá len trase s nekonečnou medzividovou väzbou, k čomu sa samozrejme telekomunikačné vlákna reálnych optických trás môžu len viac či menej blížiť [29]. Presnosť tejto metódy je 100 femtosekúnd a horšie. Je preto vhodná na meranie „holej“ trasy [28].

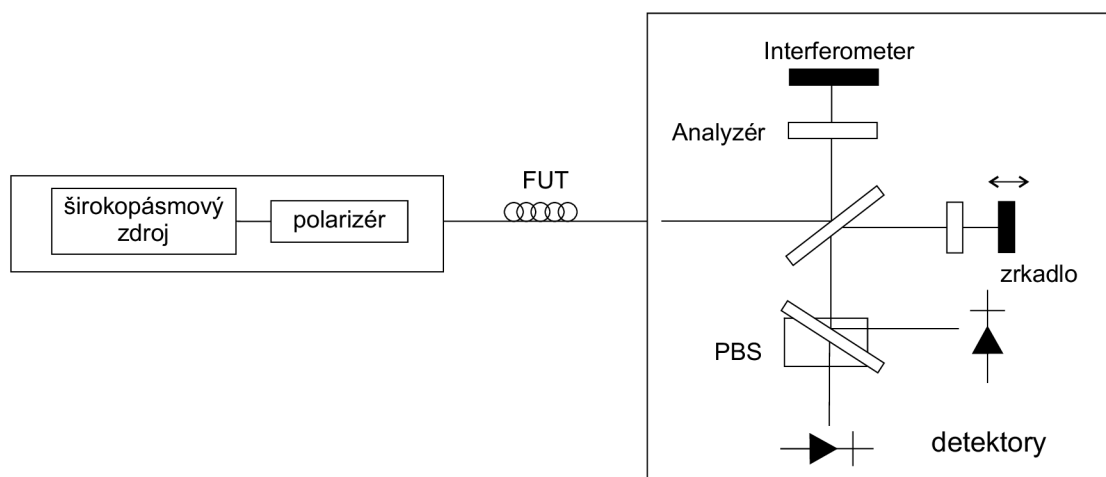


Obr. 4.7: TINTY metóda [28].

### 4.2.3 GINTY

Táto metóda je zobrazená na obr.4.8. Oproti metóde TINTY je odlišná tým, že výsledný signál obsahujúci optické žiarenie z oboch ramien interferometru je nanovo rozdelený PBS (polarizačný delič) na dve vzájomne kolmo polarizované zložky, ktoré dopadajú každá na zvláštny detektor. Na každom z dvoch detektorov dochádza k interferencii a oba interferenčné obrazce obsahujú opäť dve korelačné zložky. Tieto dve zložky sa dajú od seba oddeliť matematickými operáciami medzi oboma interferogramami (odčítaním interferogramov získame vzájomnú koreláciu, naopak keď ich sčítame dostaneme čistú autokoreláciu). Táto metóda umožňuje odstrániť autokorelačnú špičku z výsledného interferogramu a teda prevádzať vyhodnotenie PMD na samotnej vzájomnej korelačnej funkcii. Odpadá teda prekladanie výsledného grafu Gaussovou krivkou a hodnota PMD sa vyhodnocuje priamo z bodu interferogramu stredná kvadratická hodnota RMS (root mean square). K tomuto výpočtu je ale treba dodať, že autokorelácia meracieho signálu sa čiastočne uplatňuje tiež v samotnej vzájomnej korelačnej funkcii. Dochádza to pri meraní veľmi nízkych hodnôt PMD kedy sú signály z oboch navzájom kolmých polarizačných vidov prakticky zhodné a vzájomná autokorelácia je teda vlastne takmer autokoreláciou. U GINTY

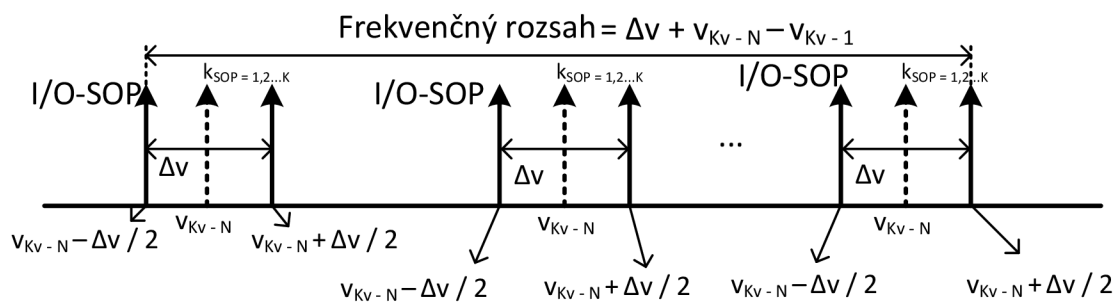
metódy poznáme však aj samotnú autokorelačnú funkciu (súčet interferografov na oboch detektoroch), no je možné i tento vplyv autokorelácie potlačiť. Výpočet oneskorenia PMD sa koriguje tým, že sa od hodnoty RMS (vypočítaná zo vzájomnej korelácie) odčíta hodnota RMS vypočítaná z autokorelácie [15]. Metóda je necitlivá na spektrálny útlm trasy a má presnosť 20 femtosekúnd [28].



Obr. 4.8: GINTY metóda [28].

#### 4.2.4 SSA

Metóda meria výkon z optického vlákna (FUT) na dvoch blízkyh frekvenciách (tzn. frekvenčný pár) od  $k=1$  až  $N$  ( $N$  je celkový počet párov cez vybraný frekvenčný rozsah). Každý pár je pridružený a nastavený náhodne a rovnomerne kódovaný I/O–SOP (input/output state of polarization) s cieľom získať DGD (differential group delay) alebo jednu náhodne kódovanú I/O–SOP PMD hodnotu. Na obr. 4.9 vidíme koncept frekvenčných párov, množstvo frekvenčných spektier, frekvenčných odstupov a rozsahov v SSA implementácií. Z hľadiska merania, veľký počet I/O SOP (1000-ky) zlepšuje neistotu, ale vyžaduje dlhé meranie a priemerný čas. Na druhú stranu malý počet I/O SOP (10-ky) vyžaduje krátke meranie a priemerný čas, ale zvyšujú neistotu. Pomocou vyššie uvedeného postupu SSA môžeme použiť ako end-to-end implementáciu alebo pre jednostrannú implementáciu [55].

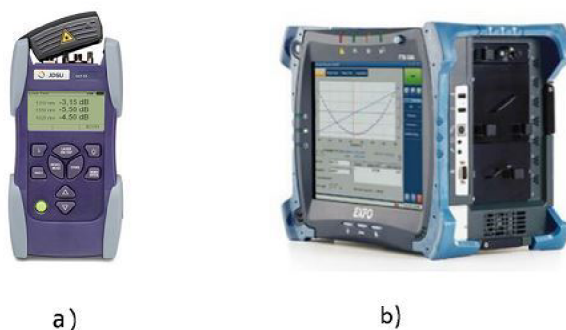


Obr. 4.9: SSA metóda [55].



## 5 ANALYZÁTORY MERANIA DISPERZIÍ

V dnešnej dobe existuje niekoľko typov meracích prístrojov (analyzátorov), ktoré umožňujú zmerať parametre daného vlákna alebo celej optickej trasy. Pre malú trasu sa dajú použiť analyzátory jednoduchšieho typu obr. 5.1 a). Dlhšie trasy vyžadujú vyšší výkon meracieho zariadenia obr. 5.1 b). Väčšinou sú tieto prístroje nasadzované priamo v teréne pri výstavbe optickej trasy. Pre ľahšiu predstavu ako to funguje v praxi by som uviedol nasledujúci príklad. Firma A požiadala firmu B o výstavbu optickej trasy v jej vlastnej lokalite (napr. kampus). Firma B zabezpečí výkopové práce a všetky náležitosti spojené s výstavbou (pokladanie a natiahnutie optických vedení od bodu metropolitného pripojenia až k danej lokalite). Po ukončení výstavby trasy je treba optickú trasu otestovať napr. aký útlm má daná trasa alebo či montáž trasy neovplyvňuje prenos po vlákne (kvalita montáže podnecuje vznik polarizačnej vidovej disperzie). Vyhodnotenie ukáže celkovú hodnotu meraného parametru buď len v číselnej podobe (jednoduchšie analyzátory) alebo aj s grafickým výstupom (väčšie analyzátory). Meranie parametrov neplatí len pri výstavbe novej trasy. Je treba brať do úvahy kde, ako a v akých podmienkach sa vlákno nachádza a pristupovať podľa toho aj k udržiavaniu trasy. Ak je vlákno pokladané do prostredia, ktoré mu spôsobuje časté ohyby, skrut alebo je namáhané v ťahu (vznik polarizačnej vidovej disperzie) je lepšie trasu premerať viac krát do roka. Analyzátory dokážu detektovať aj útlm, či prerušenie trasy. Uvedený príklad výstavby optickej trasy je v skutočnosti oveľa náročnejší. Hoci sú nižšie uvedené typy analyzátorov veľmi nákladné na druhú stranu umožňujú meranie viacerých parametrov. Pri univerzálnych analyzátoroch je možné zvlášť dokúpiť meracie moduly pre konkrétny parameter. Ku každému analyzátoru je dodávaný program pomocou ktorého môžeme výsledky (reporty) ukladať pre neskoršie porovnanie. V nasledujúcej časti by som sa zameral na hlavné vlastnosti analyzátorov, presnejšie ich modulov, ktoré som využíval pre meranie polarizačnej vidovej disperzie.



Obr. 5.1: Meracie prístroje a) číselný displej b) displej s grafickým výstupom [32] [33].

## 5.1 JDSU T-Berd®/MTS-8000 platform

Analyzátor od spoločnosti JDS Uniphase Corporation. MTS-8000 je testovacia platforma pre vysokorýchlostné siete budúcej generácie (40G a 100G). Obsahuje platformu s fyzickým, optickým a Ethernetovým rozhraním. Svojou veľkosťou umožňuje pohodlný transport z jedného miesta na druhé. Okrem rôznych meracích funkcií ponúka flexibilitu a možnosť rozšírenia pre prídavné merania a zvýšenie funkčnosti. [34] [36]. Obr. 5.2 ilustruje ako prístroj vyzerá v skutočnosti.



Obr. 5.2: Analyzátor T-Berd®/MTS-8000 platform [35].

### 5.1.1 PMD modul

Platforma MTS-8000 podporuje pokročilý modul pre meranie polarizačnej vidovej disperzie. Názorná ukážka modulu obr. 5.3. Kombináciou PMD modulu a vyššie uvedeného meracieho prístroja s T-BERD/MTS-6000 a -8000 platformou nám vznikne PMD analyzátor. Dá sa povedať že je to multifunkčné zariadenie pre meranie PMD parametru spojené s praktickosťou, mobilitou a širokým spektrom nástrojov pre požadované meranie. Pre meranie modul využíva metódu skenovania vlnových dĺžok. Podrobnosti metódy sú uvedené v kapitole 4.2.1 na strane 54 [36].

#### Rozhodujúce vlastnosti:

- metóda fixného analyzátoru štandardizovaná ITU-T, IEC a TIA/EIA,
- ľahké na používanie,
- meranie PMD hodnoty za menej ako 6 s,

- realizácia merania cez viaceré EDFA,
- jednoduché na používanie,
- ponúka dlhodobé kompletne štatistické analýzy a dlhodobé monitorovanie vlastností,
- vhodné pre každé využitie: antény, podmorské káble, zosilnené a nezosilnené linky, krátke a veľmi dlhé vzdialenosti [36].



Obr. 5.3: PMD modul [36].

### 5.1.2 OFS-11 – Optical fiber trace viewer

Je software určený pre prostredie Windows, ktorý umožňuje generovanie a prehliadanie nameraných optických trás a výsledných hodnôt. Prehliadač je nevyhnutným nástrojom pre inštalatéra trasy a jeho následné prezentovanie elektronických výsledkov napr. klientovi. Výsledky (grafické alebo číselné) je možné vytlačiť v tzv. report správe. Program nie je vyhradený len pre prehliadanie PMD parametra, ale umožňuje podporu viacerých typov parametrov (OTDR, DWDM, CD)[37] [38].

## 5.2 EXFO FTB-500 platform

Platforma od spoločnosti EXFO. Ide o platformu, ktorá má neobmedzené možnosti a špeciálny multimodulárny dizajn pre testovanie sietí budúcej generácie. Ukrýva v sebe pokročilé aplikácie a veľký výpočetný výkon [39] [40]. All-in-one (všetko v jednom) zariadenie ponúka efektívnosť a má dve verzie. Prvá verzia obsahuje 8 slotov, druhá 4 sloty. Na obr. 5.4 vidíme analyzátor EXFO a) pohľad z predu ,b) pohľad z boku (zo strany modulov) [40].

Platforma FTB-500 sa používa s dvomi modulmi a to FTB-5500B a FTB-5800. Sú určené pre veľmi dlhé trasy a pre 40 Gbit/s aplikácie. Oba moduly v spojení



Obr. 5.4: Ukážka prístroja EXFO FTB 500(1.-8 slotová verzia, 2-4 slotová verzia) [39] [40].

s EXFO FTB-500 poskytujú rýchlosť, presnosť a vysoký výkon. Tieto vlastnosti je potrebné zabezpečiť pre služby kvalitnej siete [41] [42]. Modul FTB-5800 nebude popisovaný pretože nebol použitý (je na meranie chromatickej disperzie).

### 5.2.1 FTB-5500B modul

Modul, ktorý je špecifický pre meranie polarizačnej vidovej disperzie. Polarizačná vidová disperzia predstavuje významné nebezpečenstvo pre stávajúce ale aj nanovo budované siete. S rozvojom 10G a vyššími systémami narastá riziko výskytu PMD. Tento modul je určený na meranie, analyzovanie a overenie vlastností starších vlákien alebo prípadnému testu pre aktualizáciu na akúkoľvek novú rýchlosť [41] [42]. Modul je vyobrazený na obr. 5.5.



Obr. 5.5: FTB-5500 PMD analyzátor [42].

### Rozhodujúce vlastnosti :

- 3-slotový,
- menej ako 5 sekundová testovacia doba pre akékoľvek rozsahy PMD,
- ideálny pre testovanie podzemných alebo závesných vedení,
- využitie GINTY metódy, ktorá potlačuje autokorelačné špičky,
- presné meranie a meranie pred EDFA zosilňovačmi,
- testovanie PMD od stredných vzdialeností až po extrémne dlhé optické transportné trasy s prenosovou kapacitou 10, 40 a 100 Gbit/s,
- pomocou pokročilej softvérovej analýzy môžeme zistiť PMD 2.rádu čo nám zaručuje presnejšie určit kvalitu prenosu u vysokorýchlostných systémov,
- dynamický rozsah až 50 dB,
- merací rozsah PMD od 0 do 115 ps [42] [43].

Analyzátor používa metódu GINTY, bližší popis metódy je uvedený v kapitole 4.2.3 na strane 55.

### 5.2.2 EXFO FLS-5800A (zdroj žiarenia)

Presnejšie sa jedná o typ FLS-5834A. Ide o modulovaný, polarizovaný a širokopásmový zdroj optického žiarenia. Využíva pásma C a L. Jeho využitie je napríklad možné s analyzátorom FTB-5500B, teda pre meranie polarizačnej vidovej disperzie [44]. Obsahuje výkonnú super LED ako zdroj žiarenia, modulovateľný pre meranie CD, polarizovaný pre meranie PMD a má širokopásmový spektrálny rozsah [45].



Obr. 5.6: Zdroj žiarenia EXFO FLS-5834A [44].

## 5.3 EXFO FTB-200 platform

Platforma EXFO FTB-200 je testovací přístroj od společnosti EXFO. Kompatibilný s 11 rodinami modulů pro různé aplikace na testování v terénu [47]. Přístroj používá pro měření metodu SSA (Scrambled State-of-Polarization Analysis) což znamená skramblování polarizačních stavů. Bližší je tato metoda charakterizovaná v kapitole 4.2.4 na straně 56. Na obr. 5.7 můžeme vidět tuto platformu.

### 5.3.1 EXFO FTB-5700 modul

Merací modul EXFO FTB-5700 obsahuje dva sloty měřicího modulu. Je zlučitelný s platformami EXFO FTB-200 a EXFO FTB-500. Modul poskytuje rychle a přesné měření CD/PMD na optických trasách s rozsahem až do 140 km. Kombinace CD a PMD do jednoho testu, který umožňuje technikovi charakterizovat viaceré spojení z jednoho místa. Modul bol vyvinutý špeciálne pre dnešné reálne vysokorychlostné siete. Jeho inteligentné rozhranie a funkcie zaisťujú, že parametre sú automaticky optimalizované bez ohľadu na spojenie [50] [51] [53]. Na obr. 5.8 môžeme vidieť tento modul.



Obr. 5.7: FTB-200 platform [48].



Obr. 5.8: FTB-5700 modul [51].

### **Rozhodujúce vlastnosti :**

- merací rozsah CD 0–150 km s presnosťou  $\pm 10$  ps/nm,
- merací rozsah PMD 0–20 ps s presnosťou  $\pm 0,2$  ps/nm,
- meranie CD na 8 vlnových dĺžkach,
- meranie PMD a CD pre všetky typy sietí,
- modul pre CD a PMD integrovateľný do platformy EXFO FTB-200,
- plne automatické, vysoko inteligentné rozhranie,
- jeden test na zmeranie oboch typov disperzií,
- jednoduchý management dát a programov [50] [49].

### **5.3.2 FastReporter2**

Program FastReport2 je dodávaný k testovaciemu zariadeniu EXFO FTB-200 a EXFO FTB-500. Software je dostupný cez oficiálnu stránku EXFA [54]. Určený pre získanie „off-line“ analýzy v teréne. Aplikácia umožňuje otvárať uložené reporty a následne s nimi pracovať. Dokáže pracovať s ORL, OTDR, iOLM dátami, kontrolou konektora ale aj podrobnejšiu charakteristiku pre metódy PMD a CD [46] [47] [54].



## 6 PRAKTICKÁ ČASŤ

Praktická časť tejto práce sa rozdeľuje na dve časti. Obe sa venujú meraniu parametru ovplyvňujúcemu prenos a signál na dlhú, ale aj veľmi dlhú vzdialenosť. Presnejšie ide o parameter polarizačnú vidovú disperziu. Prvá časť sa bude zameriavať na presnosť meracieho prístroja - faktor, ktorý zohráva dôležitú úlohu pri analýze celej optickej trasy a druhá časť sa bude zaoberať jedným z parametrov, ktorý podnecuje vznik polarizačnej vidovej disperzie - presnejšie teplotou.

### Časť I.

Meranie a vyhodnocovanie prebiehalo pomocou troch rôznych analyzátorov. Každý z použitých meracích prístrojov meral pomocou inej metódy. Na meranie optických trás boli využité analyzátory JDSU T-Berd®/MTS-8000 s PMD modulom, EXFO FTB-500 s modulom FTB-5500B a EXFO FTB-200 s modulom FTB-5700. Základné vlastnosti PMD modulov boli priblížené v **5 kapitole**. Všetky tri „all-in-one“ prístroje merali rovnaké optické trasy. Bolo navrhnuté niekoľko špecifických optických topológií (od najjednoduchšej až po najzložitejšiu). Meranie bolo vykonávané v reálnych podmienkach a na reálnych zariadeniach, ktoré sú pre túto oblasť typické.

### 6.1 Komponenty pre merania optických topológií

Každý prvok použitý pri inštalovaní trasy má svoju osobitnú dôležitosť. V nasledujúcej časti preto budú krátko vystihnuté hlavné prvky použité pre meranie optických trás.

#### 6.1.1 Vlákna

Bez samotného vlákna by nebola optická trasa. V tejto trase boli použité tri 40 km optické vlákna typu G.652.D a 6 km optického vlákna typu G.653 (DCF). Reálna trasa bola inštalovaná 60 km optickým vláknom tiež typu G.652.D. Pre podrobnejšie informácie o tomto type vlákna by som sa odkázal na **kapitolu 3**, kde som sa všetkým typom vlákien venoval.

#### 6.1.2 Konektory

Zakončenie samotného vlákna je realizované optickým konektorom na jednej či druhej strane. Slúži zároveň ako ochrana vlákna a pripojenie napr. k patch panelu. V našich topológiách boli použité konektory typu SC (standard connector) a FC (ferrule connector). Samotná spojka sa skladá z feruly tzv. „kolík“, samotného tela



konektoru, zámku a káblovej koncovky. Ferula môže byť plastová, kovová, keramická alebo sklená. Vlákno je v tejto časti uchytené a zbrúsené. Podľa typu zbrúsenia môže byť PC (point contact) a APC (angle point contact). Na prvý pohľad by sme povedali, že každý jeden konektor je rovnaký. Po zaostrení len na samotnú ferulu by sme si však za týmto tvrdením už nestáli. PC (doslovný preklad fyzický kontakt) ferula má na konci vypuklé vyleštené čelo optického vlákna „rovná ferula“ a APC má ferulu zbrúsenú pod uhlom  $8^\circ$ . Pre prípadné nejasnosti v ďalšej kapitole som nazýval PC konektor rovným. Je to z toho dôvodu, že konektor nie je zbrúsený o žiadny uhol. Hoci má vypuklú ferulu pôsobí ako rovný. Telo konektoru môže byť kovové alebo plastové. Pod pojmom záмок sa rozumie samotné uchytenie, ktoré môže byť realizované napr. bajonetom, maticou. Káblová koncovka je v jednoduchosti kryt na samotnú ferulu alebo celú hlavičku konektora. Vložný útlm u SC konektorov sa pohybuje od 0,2-0,45 dB. U FC konektorov sa vložný útlm pohybuje od 0,5-1 dB [56] [57] [58]. Príklad zbrúsenia konektorov a samotné konektory SC typ APC a PC je vidieť na obr. 6.1. Na obr. 6.2 je vidieť zase konektor FC typ APC a PC.

### 6.1.3 Spojky

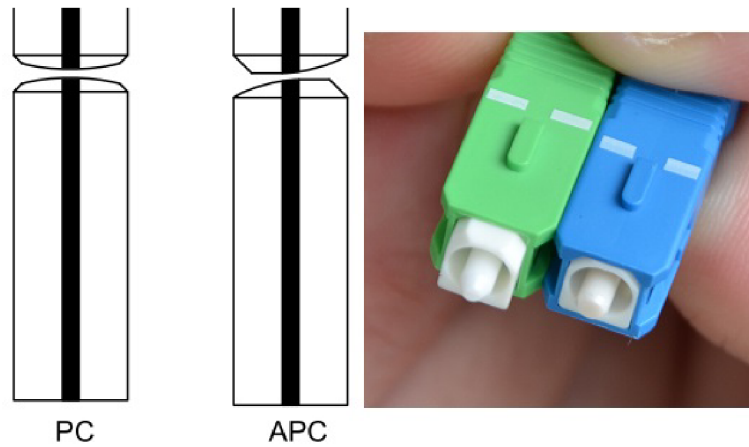
Konektorové spojky patria do kategórie ku konektorom a slúžia pre spájanie rovnakých alebo rozdielnych typov konektorov. V našom prípade boli použité konektorové spojky SC a FC v prevedení  $\rightarrow$ PC-PC a APC-APC (alebo ich kombinácia). Ilustrácia takýchto konektorových spojok je vidieť na obr. 6.3. V červenom ohraničení sú spojky na konektory SC a v žltom zase na FC.

### 6.1.4 PMD emulátor

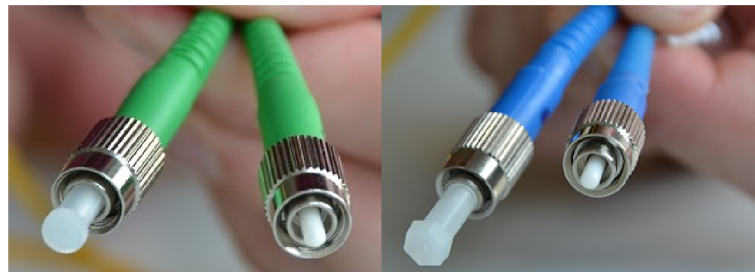
PMD emulátor ako vyplýva z názvu emulácia teda napodobňovanie polarizačnej vidovej disperzie. Presnejšie to je zavádzanie oneskorenia PMD v ps do optického vlákna [60]. Do našich optických trás bol nasadený emulátor od firmy EXFO EM-550. Názornú ukážku fixného PMD emulátoru môžeme vidieť na obr. 6.4.

### 6.1.5 Analyzátory

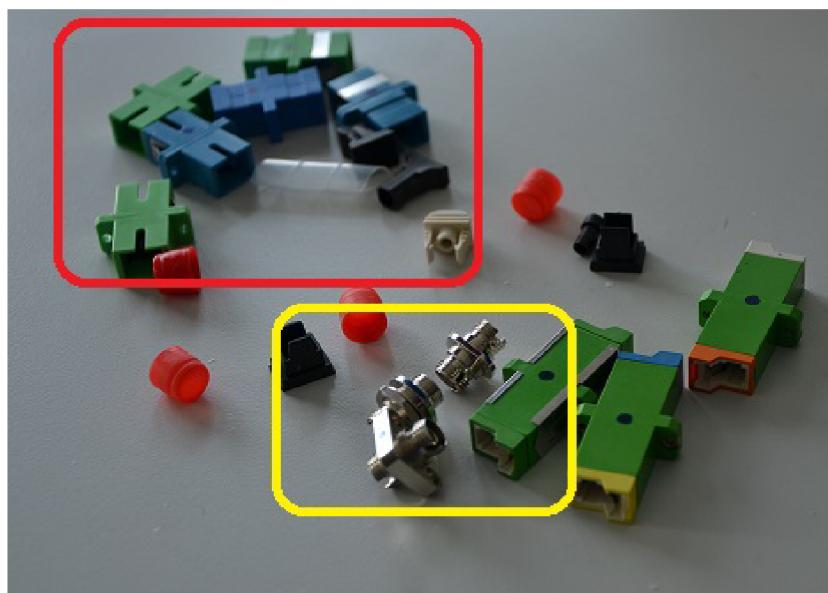
Posledným prvkom je samotné zariadenie, ktoré generuje signál a spätne ho analyzuje. Reč je o analyzátoroch, ktoré zohrali dôležitú časť pri vyhodnocovaní výsledkov. Celkovo boli použité už viackrát spomínané analyzátory T-Berd®/MTS-8000, EXFO FTB-500 a EXFO FTB-200. Základné parametre a informácie sú zaznamenané v kapitole 5.



Obr. 6.1: Ukážka SC optických konektorov [56].



Obr. 6.2: Ukážka FC optických konektorov.



Obr. 6.3: Ukážka optických spojok.



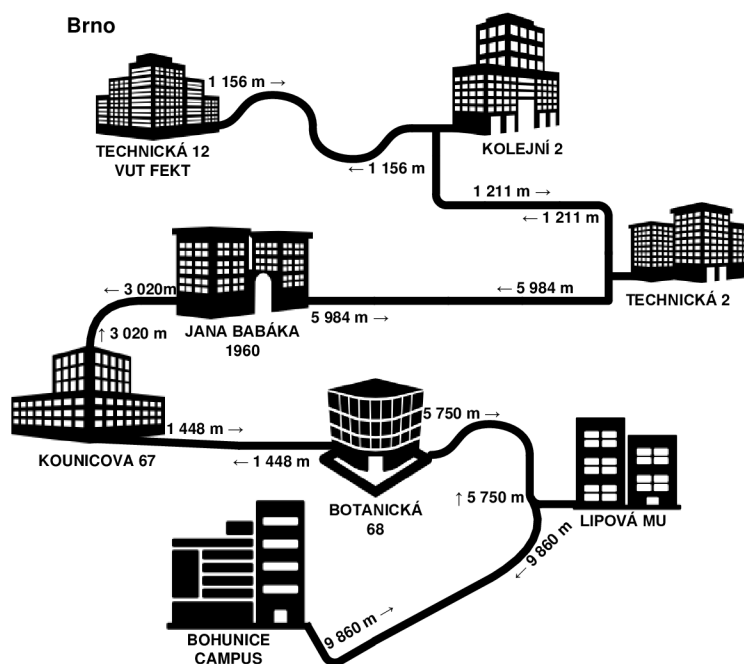
Obr. 6.4: Ukážka PMD emulátora.

## 6.2 Topológie optických trás

Prvý test ako vidíme na ľavej strane **Prílohy Topológie** pozostával z meraní troch 40 km optických vlákien typu G.652.D. Každé sa meralo najprv ako samostatná 40 km trasa a potom boli všetky tri zapojené za seba ako jedna 120 km trasa. Je dobré pripomenúť, že meranie prebiehalo vždy v smere **A**→**B**, pričom na strane **B** nebolo pripojené žiadne zariadenie. Zostal tam zapojený len konektor tzv. meranie z jedného konca. Na začiatku (**A**) bol zapojený analyzátor (po každej sade meraní každý analyzátor z vyššie spomenutých) z ktorého rovnou konektorovou spojkou SC/APC sme išli na optické vlákno a z opačnej strany vlákna sme nechali opäť pripojenú rovnú konektorovú spojkou na rovný konektor (**B**) čo signalizovalo koniec trasy. Tento istý scenár platil pre ďalšie dve trasy. V štvrtej trase bolo zmenou len zapojenie všetkých troch vlákien za sebou. Prepojovanie vlákien bolo realizované rovnou konektorovou spojkou.

Druhý test bol podobný tomu prvému s rozdielom použitia DCF vlákna. Pre pripomenutie DCF (dispersion-compensating fiber) vlákno je vlákno s veľkým záporným koeficientom disperzie. V piatej trase bolo zmerané samotné DCF vlákno. V šiestej trase bolo za 80 km vlákna vložené DCF 6 km vlákno a z neho sa išlo na 40 km vlákno. Prepojenia jednotlivých vlákien opäť za pomoci rovnej konektorovej spojky. Na pravej strane **Prílohy Topológie** vidíme zvyšné testovacie trasy. Tretí test prebiehal dá sa povedať vo výmene DCF vlákna za PMD emulátor. V siedmej trase musel byť výstup z analyzátoru prepojený z rovného konektoru FC/PC na šikmý SC/APC konektor. PMD emulátor obsahuje vstupné aj výstupné konektory v rovnom prevedení. Neurobiť prechod SC/APC→SC/PC konektor, nastane vo väčšine prípadov znehodnotenie konektoru a tým aj k skresleniu výstupných parametrov. Takéto meranie sa nemôže brať za referenčné. V ôsmej trase bolo za 80 km vlákna vložený PMD emulátor s oneskorením 1 ps. Za PMD emulátorom nasledovalo 40 km vlákno. Medzi druhým a tretím vláknom musel byť zabezpečený prechod SC/APC→SC/PC a SC/PC→SC/APC.

Štvrtý a piaty test boli totožné s tretím testom. V prípade štvrtého testu bolo oneskorenie PMD emulátora zmenené na 5 ps a pri piatom teste bolo zmenené na 10 ps. Posledný test bol meraný na reálnej trase. Reálna trasa mala 60 km a jej trasu je možné vidieť na obr. 6.5.



Obr. 6.5: Zapojenie reálnej trasy [59]

## 6.3 Výsledky analýz

Každá trasa sa merala trikrát pre presnosť merania. Namerané parametre boli zaznamenávané prehľadne do tabuľky. Z týchto hodnôt sa vypočítali parametre akými sú priemer, štandardná odchýlka, variačný koeficient, rozptyl, disperzný koeficient, maximálna a minimálna disperzia, štandardná odchýlka analyzátoru, štandardná odchýlka PMD emulátora spolu s analyzátorom. Tieto tabuľky sú spracovávané a uvedené pre každý analyzátor zvlášť.

### 6.3.1 Merania na platforme MTS-8000

V **Prílohe 1.1** sú namerané hodnoty prehľadne zapísané v tabuľke. Pre výpočet hlavných parametrov na zostrojenie grafov boli použité len niektoré z nich. V siedmej, deviatej a jedenástej trase nám prístroj neidentifikoval dĺžku vlákna. Všeobecne

emulátor obsahuje krátke referenčné vlákna a prístroj túto trasu neidentifikuje, pretože je krátka tzv. mŕtva zóna [61]. Preto pri použití PMD emulátora je potrebné pripojiť aspoň 1 km vlákna. V tomto prípade, keďže prístroj nám trasu zmeral, nebude problém s predradným vláknom, ale pôjde o vlastnosť prístroja, ktorá začne identifikovať trasu od nejakej vyššej hodnoty. Trasa osem a jedenásť sa merala len dvakrát. Príčinou v oboch trasách bolo uloženie tretieho merania ako druhé (došlo k prepísaniu), tým pádom ostali len dve merania. Zistilo sa to až po otvorení meraní v programe na reporty.

V tabuľke 6.1 je zaznamenaná absolútna neistota prístroja a etalónové hodnoty PMD emulátora sú zobrazené v 6.2. Táto tabuľka bude uvádzaná len pre tento analyzátor. V nasledujúcich dvoch analyzátoroch sa len odkážem na túto tabuľku pretože bol používaný rovnaký PMD emulátor. Obsah týchto tabuliek je dôležitý a bude vysvetlený v nasledujúcej časti.

**Príloha 1.2** zobrazuje vypočítané parametre, pre ktoré sme použili hodnoty s **Prílohy 1.1**. Prvý stĺpec je hodnota priemernej hodnoty PMD. To znamená, že je vypočítaný priemer z troch nameraných hodnôt. Druhý stĺpec je štandardná odchýlka, ktorá bola určená ako [62]:

$$\text{štandardná odchýlka} = \sqrt{\sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad [\text{ps}], \quad (6.1)$$

kde  $x_i$  určuje hodnotu nameranej PMD,  $\bar{x}$  určuje priemernú hodnotu PMD a  $n$  počet celkových hodnôt PMD. Ďalším parametrom je variačný koeficient, ktorý bol získaný podielom dvoch predošlých parametrov teda:

$$\text{variačný koeficient} = \left( \frac{\bar{x}}{\text{odchýlka}} \right) \cdot 100 \quad [\%], \quad (6.2)$$

kde  $\bar{x}$  je hodnota priemernej PMD a *odchýlka* je hodnota štandardnej odchýlky. Štvrtý parameterom v tabuľke je rozptyl. Vypočítame ho ako [63]:

$$\text{rozptyl} = \sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad [\text{ps}], \quad (6.3)$$

pričom  $x_i$  opäť určuje hodnotu nameranej PMD,  $\bar{x}$  je priemerná hodnota PMD a  $n$  počet celkových hodnôt PMD. Môžeme si všimnúť, že je to rovnaký vzorec ako pre štandardnú odchýlku akurát s tým rozdielom, že sa nepoužije druhá odmocnina. Nasleduje piaty parameter, ktorý je vypočítaný zo šiesteho a siedmeho parametru. Šiesty parameter je maximálna PMD hodnota a siedmy parameter je minimálna hodnota PMD. Piaty parameter teda disperzia sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\text{disperzia} = \frac{\text{max} - \text{min}}{\bar{x}} \quad [-], \quad (6.4)$$

kde *max* predstavuje maximálnu PMD, *min* je minimálna PMD a  $\bar{x}$  nám určuje priemernú hodnotu PMD. Deviaty parameter je odchýlka analyzátoru. V tabuľke

6.1 je výrobcom udaná hodnota neistoty (chyba analyzátoru). Hodnotu v deviatom stĺpci sme vypočítali podľa vzťahu :

$$\text{odchýlka analyzátoru} = 2\% z \bar{x} \quad [\text{ps}], \quad (6.5)$$

kde  $\bar{x}$  je priemerná hodnota PMD. Pre vypočítanie posledného parametru je potreba poznať etalónové hodnoty pre každé oneskorenie PMD emulátora. Tieto hodnoty je možné vidieť v tabuľke 6.2. Parameter sa vypočítal pomocou nasledujúceho vzťahu :

$$\text{odchýlka analyzátoru a emulátora} = \sqrt{((2\% \cdot \bar{x})^2 + \text{odchýlka}^2)} \quad [\text{ps}], \quad (6.6)$$

$\bar{x}$  vyjadruje priemernú hodnotu PMD a *odchýlka* určuje štandardnú odchýlku pre dané oneskorenie PMD emulátora.

Tab. 6.1: Neistota analyzátoru T-Berd® [36].

<b>PMD analyzátor</b>
<b>Absolútna neistota (chyba prístroja)</b>
2 % PMD

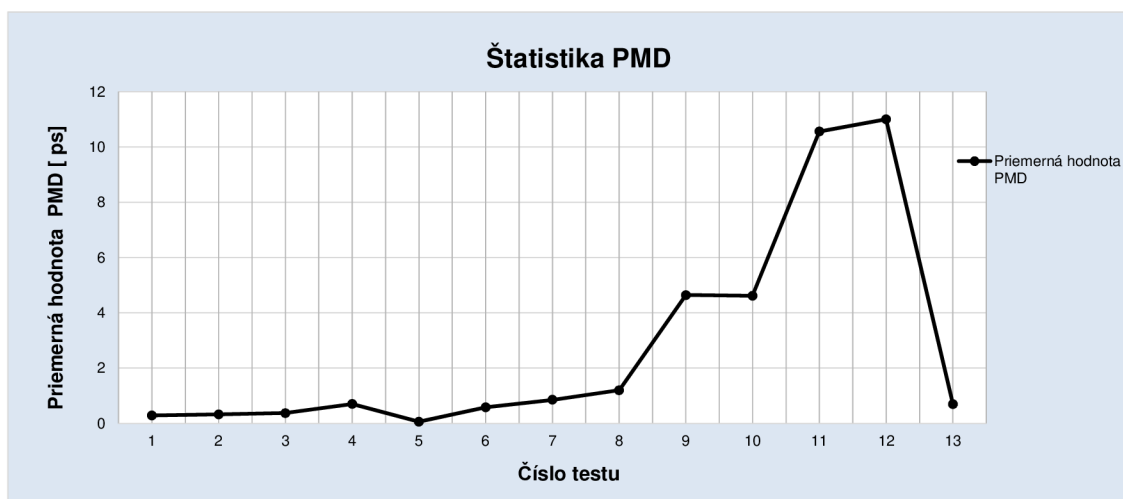
Tab. 6.2: Etalónové hodnoty emulátora.

<b>Etalón</b>	<b>1 ps</b>	<b>5 ps</b>	<b>10 ps</b>
<b>Priemerná PMD [ps]</b>	0,91	5,2	10,8
<b>Štandardná odchýlka [ps]</b>	0,11	0,37	0,44
<b>Min. a Max. PMD hodnota [ps]</b>	0,61 a 1,19	3,83 a 5,68	9,9 a 11,7

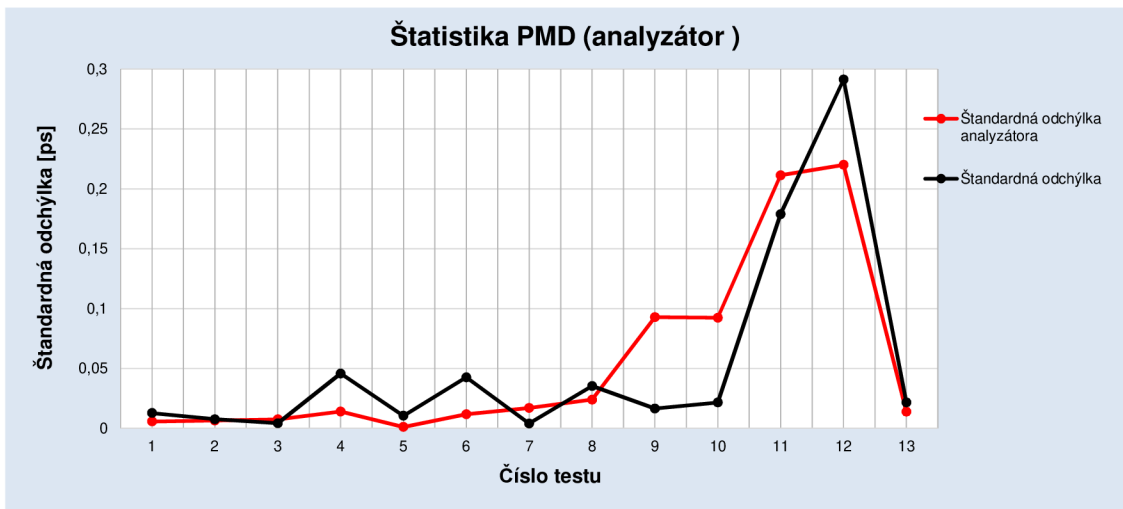
### 6.3.2 Grafický výstup - metóda skenovania vlnových dĺžok

Z Prílohy 1.2 sme v nasledujúcej časti vyhotovili grafy. Nejedná sa o klasickú grafickú závislosť, kde jedna veličina závisí od druhej. V našom prípade sme mali len jeden parameter (veličinu) - osa  $y$  a na ose  $x$  sme mali číslo testu. Z tohoto dôvodu môžeme brať grafy ako štatistické.

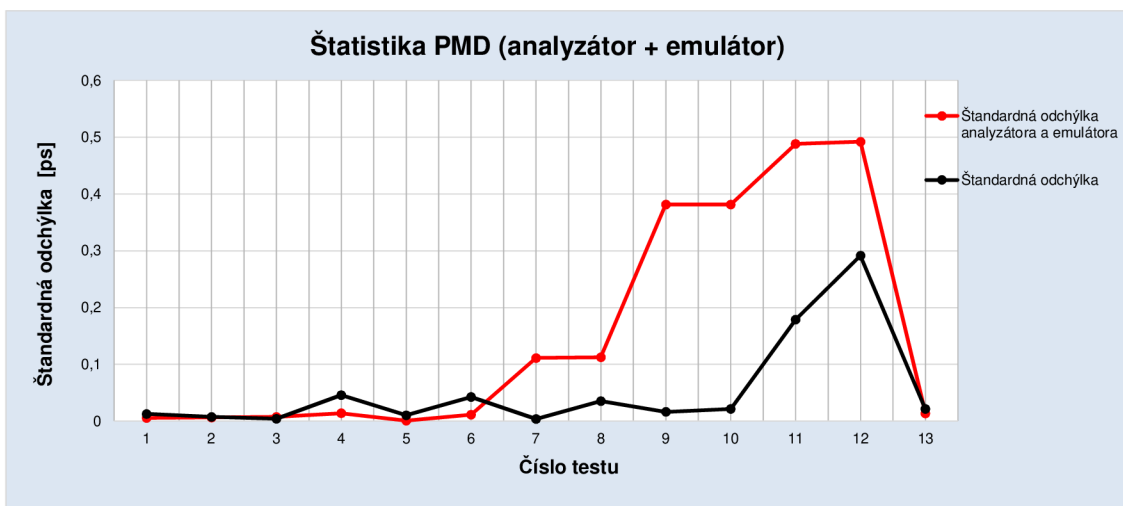
Na obr. 6.6 je štatistika zmeny priemernej hodnoty PMD v jednotlivých testoch. Obr. 6.7 zobrazuje štandardnú odchýlku analyzátoru a štandardnú odchýlku PMD. Ako sme vypočítali tieto dva parametre bolo uvedené v kapitole 6.3.1 na strane 69. Z grafu je pekne vidieť, že rozdiely prvých troch testov neboli skoro žiadne. V štvrtom a šiestom teste bol rozdiel v stotinách. Väčšie rozdiely nastali pri testoch s použitím emulátora s hodnotou 5 a 10 ps. Na obr. 6.8 je priebeh štandardnej odchýlky PMD rovnaký a hodnota štandardnej odchýlky analyzátoru sa nám zvýšila, no nie všade. Vyššie rozdiely sú zaznamenané len pri použití s emulátorom, čo je očakávané keďže sme do výpočtu zahrňovali výrobcom zadanú hodnotu pre emulátor. Na obr. 6.9 je vyneseny graf tolerančného pásma v stĺpcovom zobrazení. Ako samotný názov napovedá jedná sa o overenie, či namerané hodnoty neprevyšovali hornú i dolnú hranicu tolerančného pásma (prípustné hodnoty, ktoré vyhovujú daným požiadavkám) alebo ju prevyšovali (indikujú, že daná hodnota nevyhovuje daným požiadavkám a nemôžeme s ňou počítať). V našom prípade hodnoty sedia v tolerancii a ani jedna hodnota z trinástich testov v tomto prípade nepresiahla tolerančné pásmo.



Obr. 6.6: Priemerná hodnota PMD.

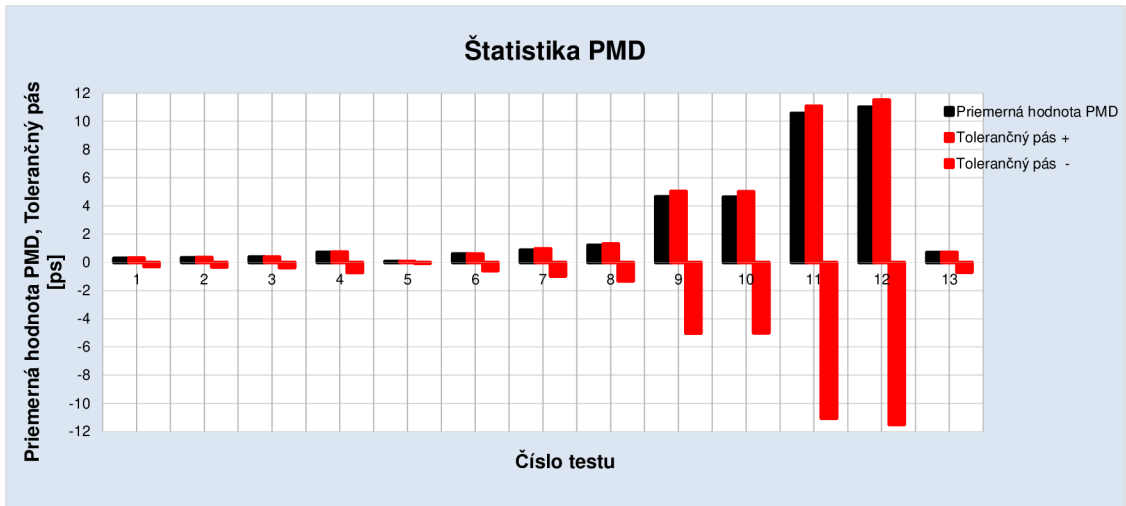


Obr. 6.7: Štandardná odchýlka analyzátor a PMD.



Obr. 6.8: Štandardná odchýlka analyzátor s emulátorom a PMD.





Obr. 6.9: Tolerančné pásmo.

### 6.3.3 Merania na platforme EXFO FTB-5500B

**Príloha 2.1** slúži opäť ako zdroj hodnôt pre výpočet parametrov uvedených v **Prílohe 2.2**. Všetky parametre s výnimkou deviateho a desiateho sa počítali pomocou rovnakých vzťahov ako boli uvedené v kapitole 6.3.1 na strane 69. Deviaty parameter sa počítal s hodnotami, ktoré sú uvedené v tabulke 6.3 pre PMD analyzátor. Vzťah pre výpočet bol nasledujúci :

$$\text{odchýlka analyzátoru} = 0,02 + (2\% z \bar{x}) \quad [\text{ps}], \quad (6.7)$$

kde  $\bar{x}$  je priemerná hodnota PMD. Posledný parameter využíval hodnoty opäť z tabulky 6.2 a 6.3. Vzťah je popísaný takto :

$$\text{odchýlka analyzátoru a emulátora} = \sqrt{(0,02 + (2\% \cdot \bar{x})^2 + \text{odchýlka}^2)} \quad [\text{ps}], \quad (6.8)$$

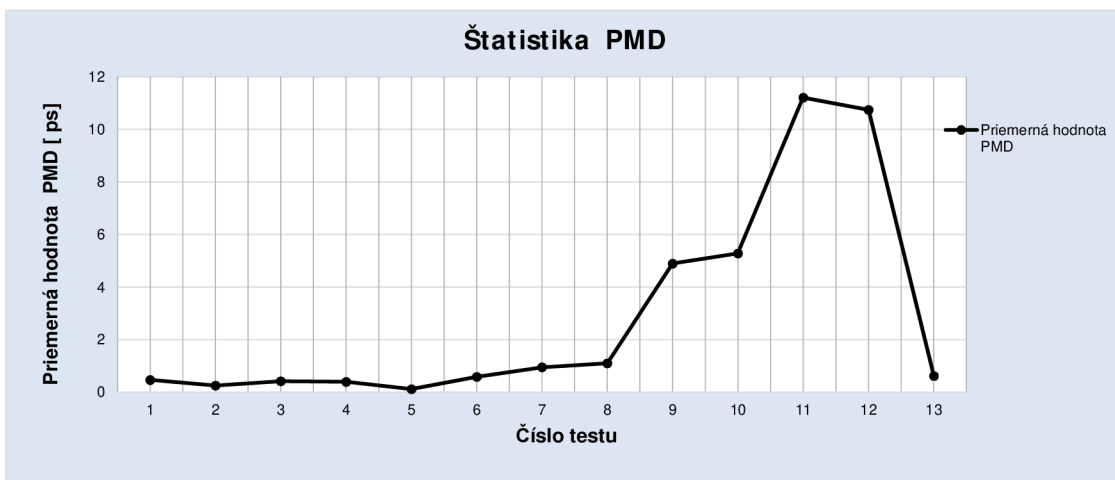
kde  $\bar{x}$  je priemerná hodnota PMD a *odchýlka* určuje štandardnú odchýlku pre dané oneskorenie PMD emulátora.

Tab. 6.3: Neistota analyzátoru EXFO FTB-500 [42].

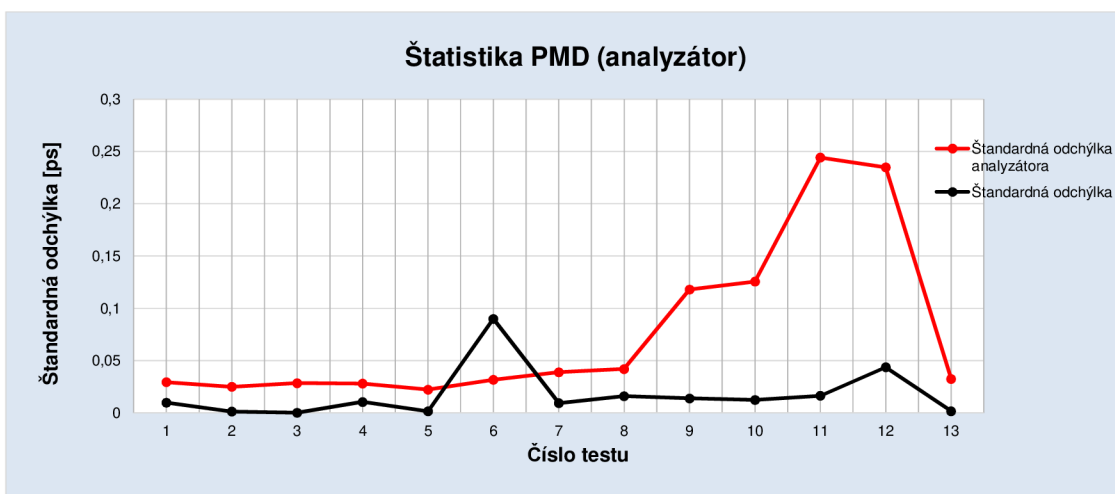
<b>PMD analyzátor</b>
<b>Absolútna neistota (chyba prístroja)</b>
$\pm(0,020 + 2\% \text{ PMD})$
<b>CD analyzátor</b>
<b>Absolútna neistota (chyba prístroja)</b>
20km G.652 - 1,6 ps/nm
120km G.652 - 3,1 ps/nm

### 6.3.4 Grafický výstup - metóda interferometrická (GINTY)

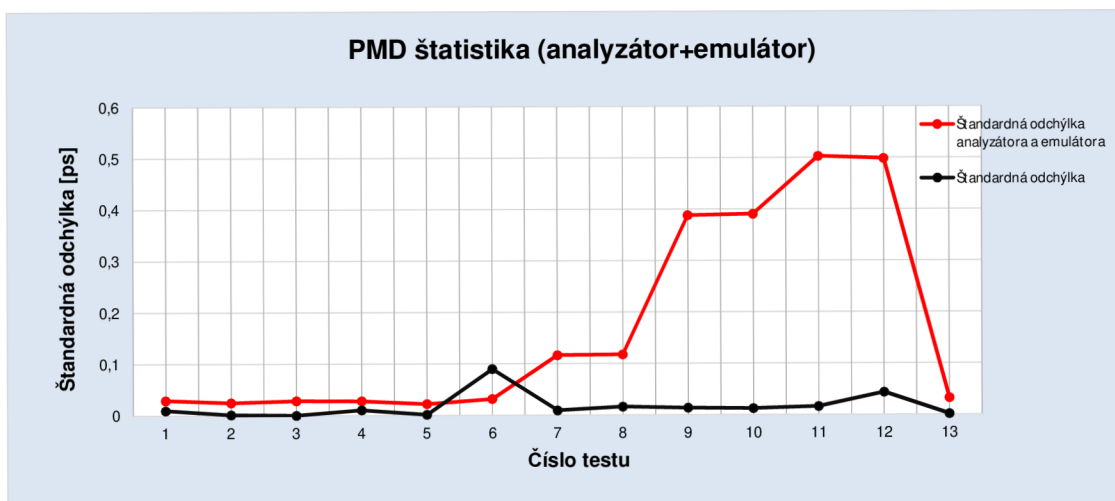
Rovnaký postup pri zostrojovaní grafov bol aj pre EXFO FTB-500. Rozdiel bol v použití nameraných a vypočítaných hodnôt odpovedajúcich tomuto analyzátoru. Na zostrojenie grafických priebehov sa používala **Príloha 2.2**. Prvý obrázok 6.10 znázorňuje priebeh priemernej hodnoty PMD jednotlivých testovaných topológií. Na obr.6.11 je vidieť rozdiel medzi štandardnou odchýlkou a štandardnou odchýlkou PMD hodnoty. Oproti predchádzajúcemu meraniu vidíme rozdiel už pri prvých meraniach. Hodnoty majú malé rozdiely a držali sa takto až po ôsmi test, kde sa začalo merať s PMD emulátorom. Tretí graf 6.12 opäť vychádza z hodnôt z posledného grafu pričom sa musí počítať ešte s hodnotami PMD emulátora v tých topológiách pri ktorých bol použitý. Graf tolerančného pásma 6.13 nám potvrdil, že všetky hodnoty sú v tolerančnom pásme.



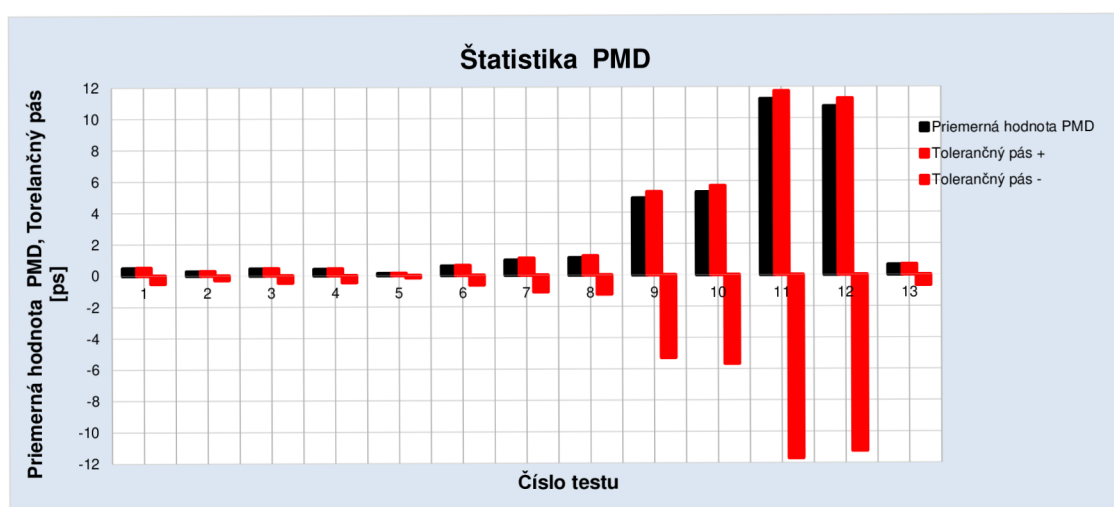
Obr. 6.10: Priemerná hodnota PMD.



Obr. 6.11: Štandardná odchýlka analyzátor a PMD.



Obr. 6.12: Štandardná odchýlka analyzátor s emulátorom a PMD.



Obr. 6.13: Tolerančné pásmo.

### 6.3.5 Merania na platforme EXFO FTB-5700

Ako tretia príloha a zároveň posledná s nameranými hodnotami je **Príloha 3.1**. Vypočítané parametre sú uvedené v **Prílohe 3.2**. Osem parametrov je počítaných podľa rovnakých vzťahov ako predchádzajúce (uvedené v kapitole 6.3.1 na strane 69). Posledné dva využívajú opäť tabuľkové hodnoty z 6.2 a 6.4. Deviaty parameter sa počítal ako :

$$\text{odchýlka analyzátoru} = 0,2 + (5\% z \bar{x}) \quad [ps], \quad (6.9)$$

kde  $\bar{x}$  je priemerná hodnota PMD. Desiaty parameter bol takisto počítaný pomocou zmeneného vzťahu :

$$\text{odchýlka analyzátoru a emulátoru} = \sqrt{(0,2 + (5\% \cdot \bar{x}))^2 + \text{odchýlka}^2} \quad [ps], \quad (6.10)$$

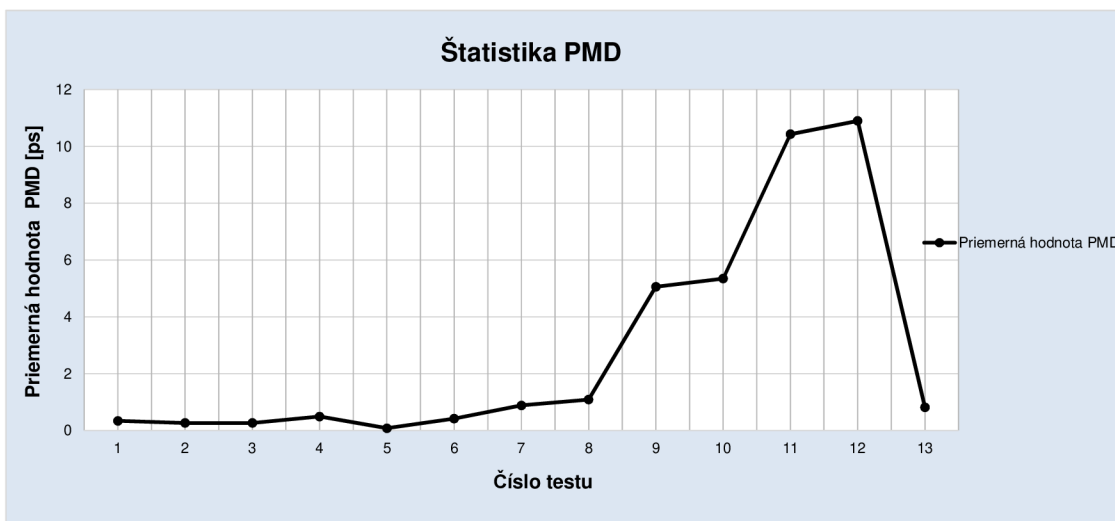
kde  $\bar{x}$  je priemerná hodnota PMD a *odchýlka* určuje štandardnú odchýlku pre dané oneskorenie PMD emulátora.

Tab. 6.4: Neistota analyzátoru EXFO FTB-200 [52].

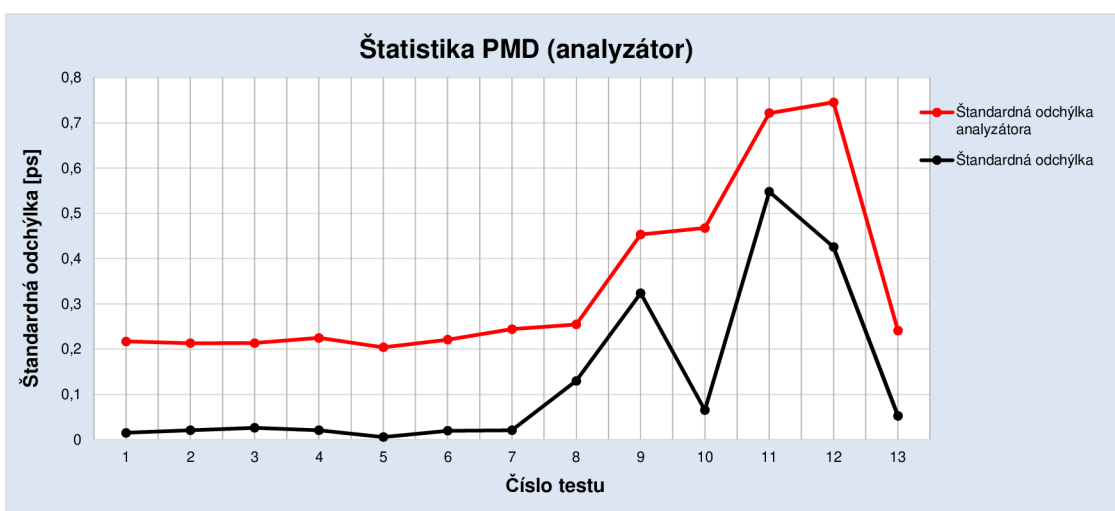
<b>PMD analyzátor</b>
<b>Absolútna neistota (chyba prístroja)</b>
$\pm(0,2 + 5\% \text{ PMD})$
<b>CD analyzátor</b>
<b>Absolútna neistota (chyba prístroja)</b>
$\pm 10\%$

### 6.3.6 Grafický výstup - metóda skramblovania polarizačných stavov (SSA)

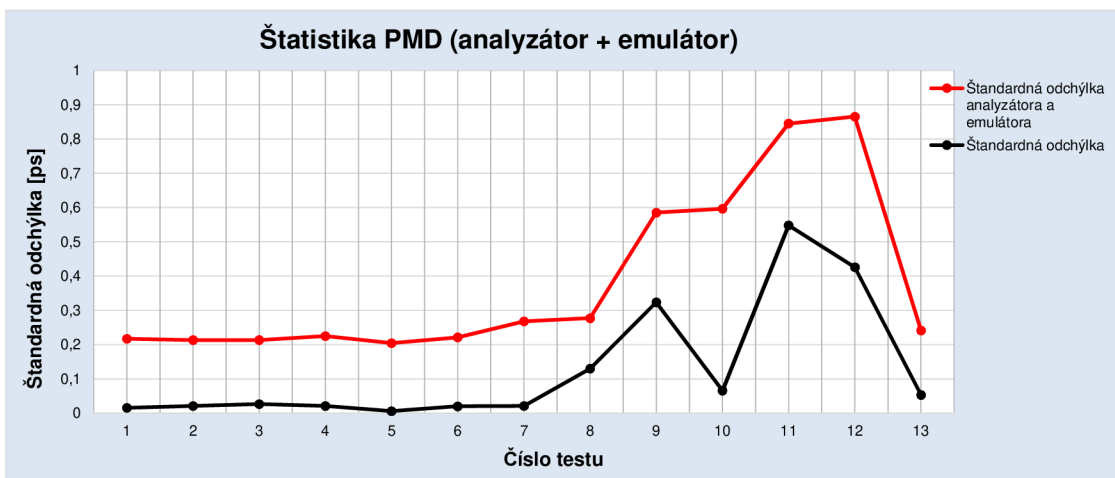
Posledný analyzátor nebol výnimkou a jeho postup bol opäť totožný s predchádzajúcimi dvomi analyzátormi. Pre zostrojenie grafov sa používala tabuľka z **Prílohy 3.2**. Priebeh priemernej hodnoty PMD je zaznamenaný na obr. 6.14. V grafoch obr. 6.15 a obr. 6.16 narástol rozdiel opäť o nejakú hodnotu oproti dvom predchádzajúcim analyzátorm. Hodnoty v tolerančnom pásme obr. 6.17 neprekročili hornú ani dolnú hranicu, takže hodnoty môžeme brať za vyhovujúce. Je tu vidieť ako aj na ostatných grafoch tolerancie, kde je ešte rezerva na prekročenie prípustnej hodnoty.



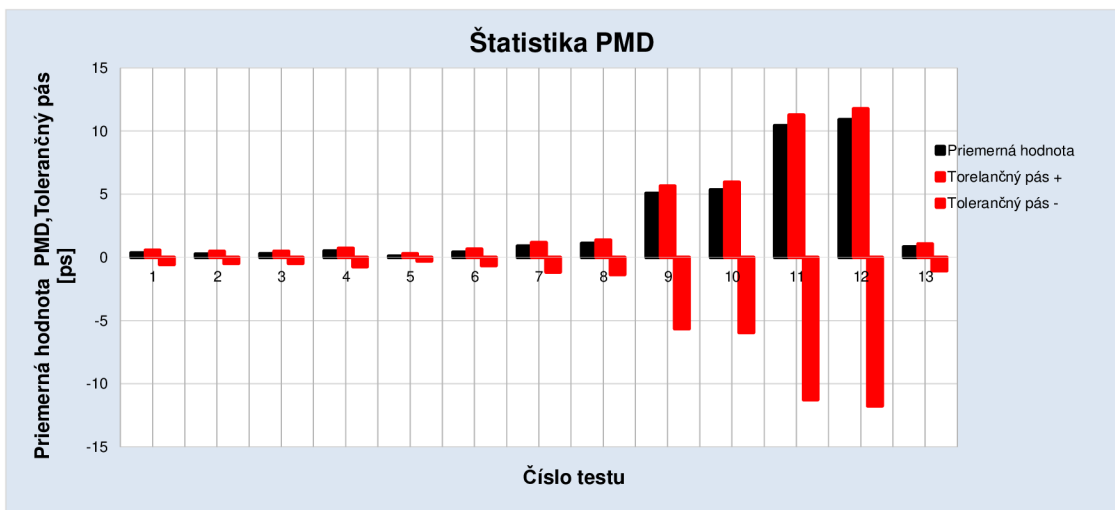
Obr. 6.14: Priemerná hodnota PMD.



Obr. 6.15: Štandardná odchýlka analyzátoru a PMD.



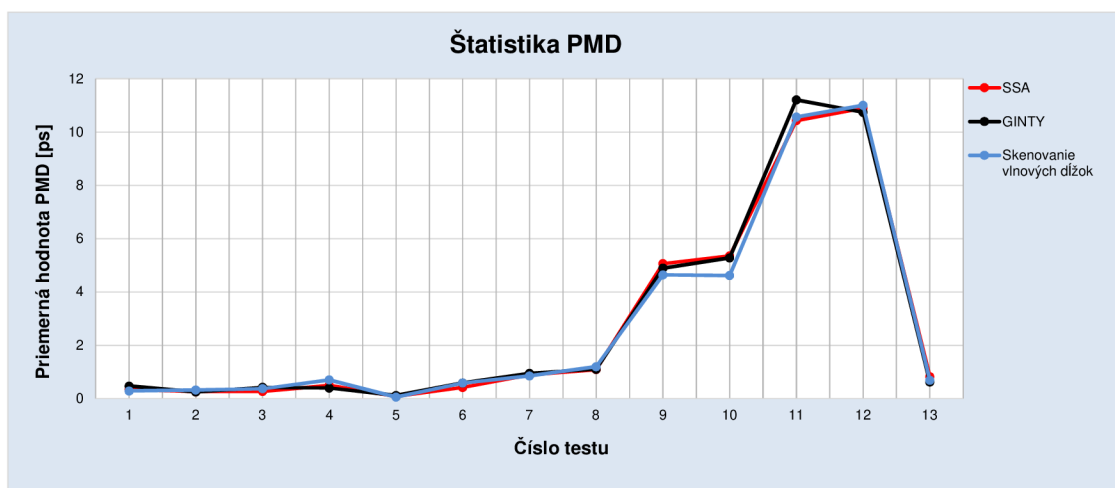
Obr. 6.16: Štandardná odchýlka analyzátor a emulátorom a PMD.



Obr. 6.17: Tolerančné pásmo.

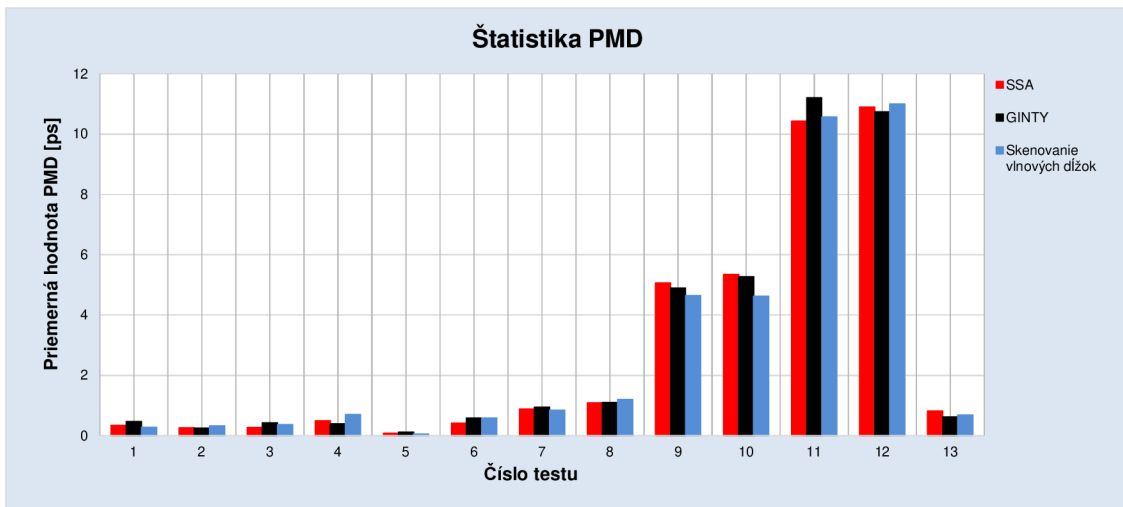
### 6.3.7 Grafické porovnanie jednotlivých analyzátorov

V nasledujúcej časti sú prehľadne spracované vybrané parametre pre všetky tri analyzátory súčasne pre rozdielnosť medzi metódami. Na obr. 6.18 vidíme priemernú hodnotu PMD meniacu sa podľa jednotlivých testov. Je z neho vidieť, že všetky tri metódy sa takmer zhodujú. Nie je vidno žiadny obrovský skok jednej metódy od druhej. Keď sa pozrieme na obrázok nižšie 6.19 môžeme to lepšie pozorovať na stĺpcovom vyjadrení jednotlivých testovaných trás. Keď jedna metóda mala markantný rozdiel od ďalších dvoch metód v jednom teste v ďalšom teste bola práve táto metóda tá, čo mala najmenšiu hodnotu PMD. Keď si povšimneme striedalo sa to takto po celú dobu testovania. Môžeme povedať, že ani jedna z metód v týchto topológiách nedosahovala takých rozdielov aby sme nutne preferovali jednu alebo druhú metódu. V nasledujúcich obrázkoch obr. 6.20 a obr. 6.21 sú uvedené grafy pre štandardnú odchýlku samotného analyzátoru a analyzátoru spolu s PMD emulátorom. Výrobcom udávaná hodnota nazývaná aj ako neistota bola pre každý analyzátor rôzna. Preto hodnoty jedného analyzátoru majú veľký rozdiel od zvyšných dvoch takmer totožných analyzátorov. V konečnom dôsledku ako sme mohli vidieť v grafickom výstupe každej metódy boli hodnoty jednotlivých testov v tolerancii. V tolerančnom pásme je zahrnutá neistota samotného prístroja aj s priemernou hodnotou PMD.

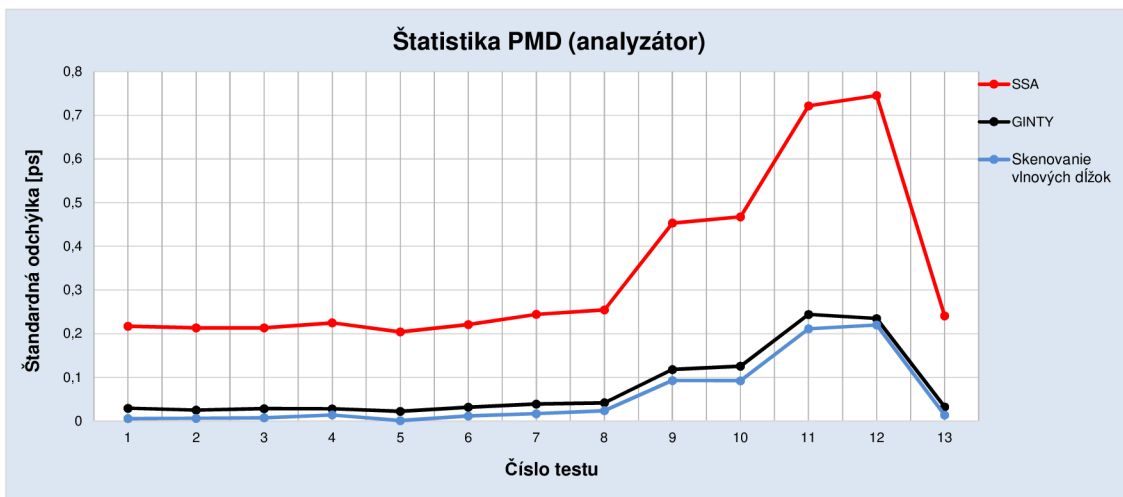


Obr. 6.18: Porovnanie priemernej hodnoty PMD zmeranej rôznymi metódami.

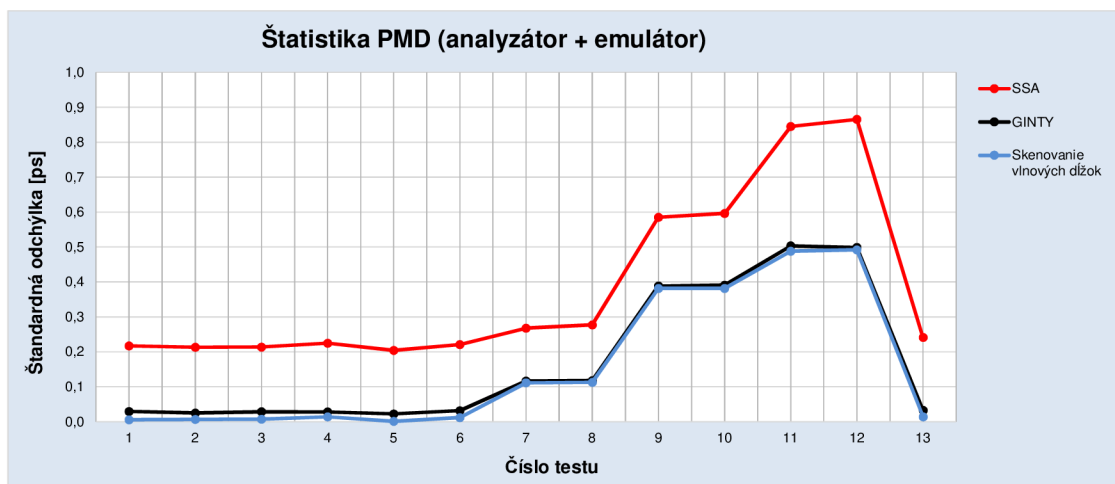




Obr. 6.19: Porovnanie priemernej hodnoty PMD zmeranej rôznymi metódami (stĺpcové zobrazenie).



Obr. 6.20: Porovnanie štandardnej odchýlky jednotlivých analyzátorov.



Obr. 6.21: Porovnanie štandardnej odchýlky spolu s emulátorom pre jednotlivé analyzátory.

## Časť II.

### 6.4 Merania v Teplotnej komore

Na samotné merania bola využitá teplotná komora Vötsch Vc<sup>3</sup> 7018 (jej základné vlastnosti budú uvedené nižšie v kapitole), EXFO FTB-500 s modulom FTB-5500B, EXFO FLS-5800A ako zdroj žiarenia, počítač, vlákna typu G.652.D (500 m) a G.657 a pasívne prvky optickej siete ako sú rôzne typy konektorov (konkrétne SC-PC, FC-PC, SC-APC, FC-APC, E2000-APC), delič 1:8 (splitter) a optická distribučná sieť, ktorá bola poskladaná z vyššie uvedených prvkov.

#### 6.4.1 Teplotná komora Vötsch Vc<sup>3</sup> 7018

Jedná sa o testovacie zariadenie (komoru) s patentovaným systémom klimatizácie a regulácie teploty podľa stanovených noriem s ohľadom na ľahké ovládanie, výkon a vybavenie. Umožňuje vytvoriť produktívne testy pre veľké množstvo produktov.

##### Rozhodujúce vlastnosti :

- digitálny merací a riadiaci systém Simpac,
- ControlPad na zobrazenie hodnoty teploty, osvetlenie (tlačítka vypnutia a zapnutia osvetlenia v komore),
- Ethernet a USB rozhranie,

- možnosť pripojenia cez sieťové rozhranie alebo webový server, kde autorizovaný používateľia môžu siahnuť na aktuálne testy cez internet,
- psychometrické meranie vlhkosti, samočistiaci senzor
- možnosť pripojenia cez sieťové rozhranie alebo webový server, kde autorizovaný používateľia môžu siahnuť na aktuálne testy cez internet. Namerané dáta, reporty môžu byť organizované po sieti (pomocou softvéru Simpati sa môžeme pripojiť a využívať testy),
- bezpečnostné vypnutie proti nízkym a vysokým teplotám, nastaviteľný oddelený senzor,
- kalibrované teplotné hodnoty (+ 23 °C a + 80 °C) [64] .

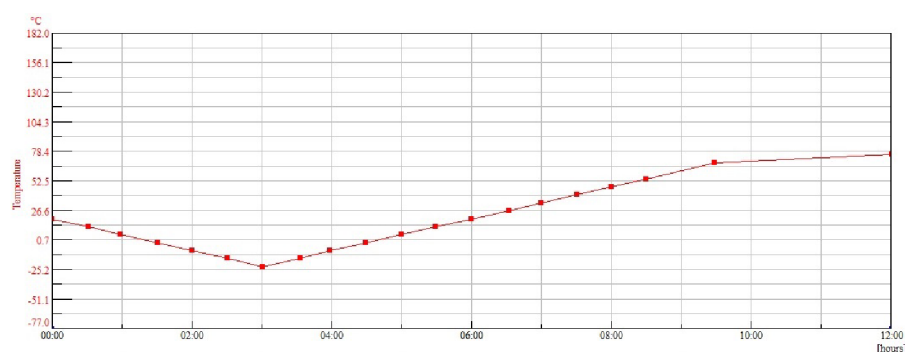
Teplotnú komoru môžeme vidieť na obrázku 6.22, kde na ľavo je samotná komora a na pravo je senzor vlhkosti, dva nerezové otvory a výrez.



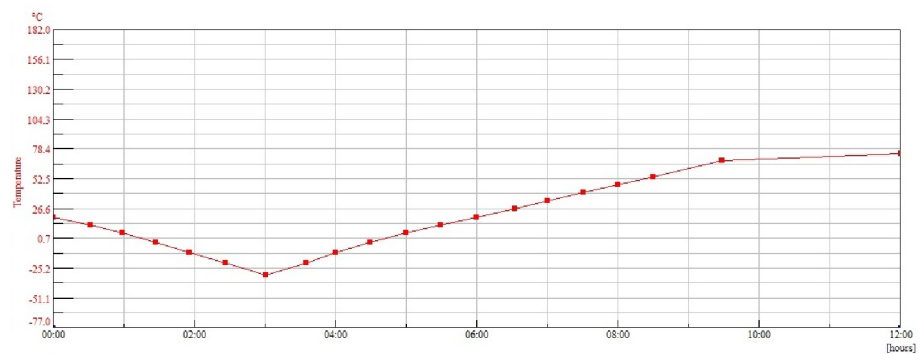
Obr. 6.22: Teplotná komora Vötsch Vc<sup>3</sup> 7018 [64].

## 6.5 Popis meraní

Všetky zmieňované prvky v úvode druhej časti tejto kapitoly boli merané na teplotnej stupnici od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $+76\text{ }^{\circ}\text{C}$  (teplotné rozsahy prvkov boli zvolené aj podľa datasheetov jednotlivých prvkov). Teplota bola nastavená pomocou príslušného programu (Simpati) cez počítač. Bol vytvorený teplotný graf a to tak aby zmeny teploty mali plynulý prechod z aktuálnej teploty komory (okolo  $15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) do mínusových teplôt až po plusové maximum (aby teplota bola na určitý čas ustálená). Je dobré poznamenať, že aj keď teplotná komora umožňuje nastaviť vlhkosť, tak v tomto prípade bola vypnutá a nezasahovala nám do celkového merania. Nastavený teplotný graf slúžil ako etalón pre ďalšie merania (6.23 6.24). Z obrázkov je vidno, že oba grafy majú rovnaký priebeh s malým rozdielom. Pri etalóne pre vlákna sa nastavilo klesanie teploty o trochu nižšie. Pred každým meraním sme si pripravili prvky, ktoré mali byť podrobené ďalšiemu meraniu (väčšinou boli predpripravené dopredu). Po vložení meraného prvku do teplotnej komory sme sa museli uistiť, či je dobre utesnený zárez (aby neunikala zbytočne teplota) vďaka ktorému sme mohli prepojiť optické vlákno ďalej (tzn. aby z otvoru trčala len malá časť vlákna s konektormi). Jedna časť konektoru bola zapojená do predradného optického vlákna a z tadiaľ do analyzátoru EXFO FTB-500 a druhá časť bola pripojená do optického zdroja žiarenia EXFO FLS-5800A. Analyzátor umožňoval zvoliť ako dlho bude meranie prebiehať a s akým intervalom. Každé meranie bolo pustené na 12 hodín, pričom PMD hodnota bola odmeraná a zaznamenaná s intervalom 15 minút do súboru (v našom prípade na USB kľúč.). Fotky pracoviska kde meranie prebiehalo môžeme vidieť na nižšie uvedených obrázkoch 6.25, 6.26 a 6.27.



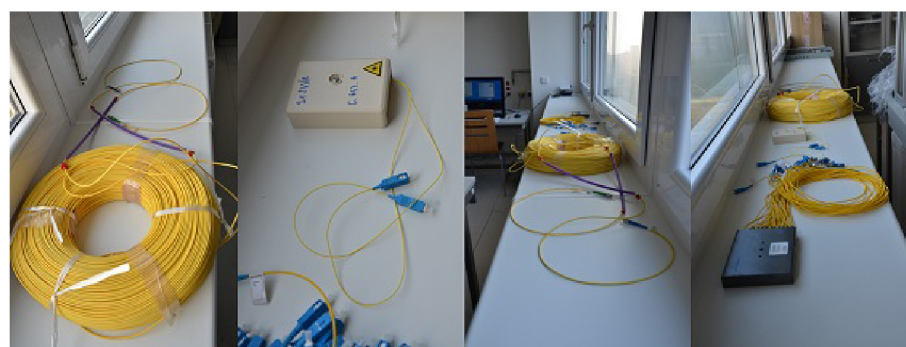
Obr. 6.23: Etalón teplôt pre konektory, zvary, ODN a delič



Obr. 6.24: Etalón teplôt pre vlákna.



Obr. 6.25: Ukážka zapojenia pracoviska a teplotnej komory (vo vnútri meraná vzorka vlákna G.657).



Obr. 6.26: Ukážka meraných prvkov.



Obr. 6.27: Ukážka zapojenia do analyzátora a zdroja žiarenia.

## 6.6 Analýza meraní

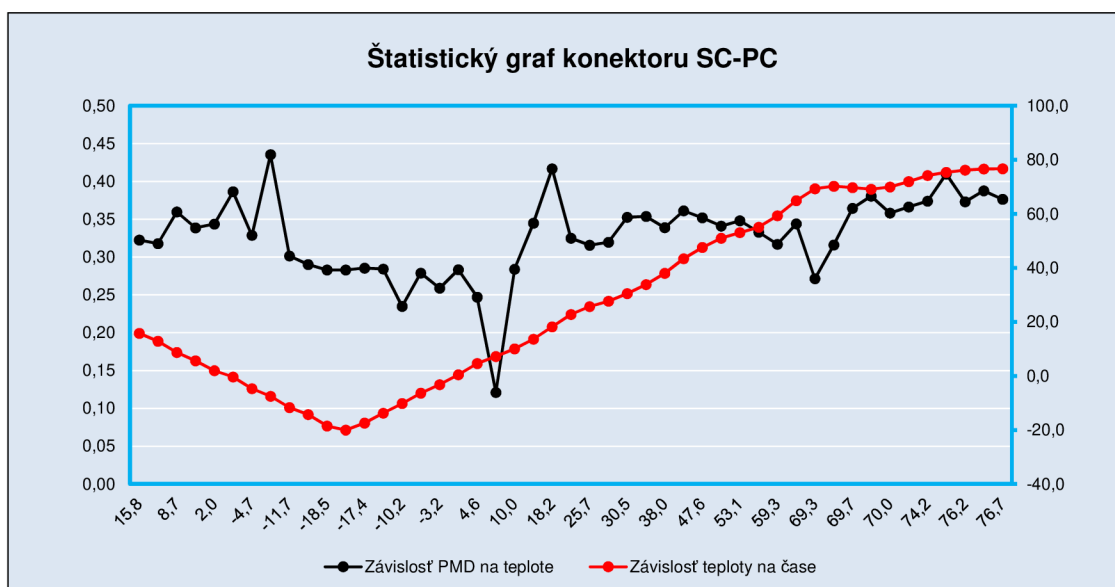
Uložené hodnoty boli spracované pomocou programu FastReporter (**popísaný v kapitole 5.3**). Na základe nameraných údajov sa vytvorili prehľadné tabuľky, do ktorých sa evidovali parametre ako PMD hodnota, PMD koeficient, PMD hodnota 2-ho rádu a PMD koeficient 2-ho rádu, čas (kedy bola daná hodnota zapísaná) a teplota. Na základe času sa mohla odčítať hodnota z grafu teploty z programu Simpati. Išlo o graf, ktorý presne zapisoval priebeh aktuálnej teploty (klesanie na  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a v opačnom prípade stúpanie na  $+76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) v danom časovom okamihu. Bolo preto dôležité rovnako zosynchronizovať štart komory a analyzátora v jeden časový okamih (inými slovami spustiť ich naraz). Evidencia teploty do každej tabuľky prebiehala tak, že sa vzal čas v ktorom bola odpísaná PMD hodnota a našla sa jej v tom istom časovom okamihu príslušná teplota v grafe teploty (program umožňoval nielen grafické zobrazenie priebehu teplôt, ale i textové). So všetkými potrebnými parametrami sa mohli zostrojiť grafy, tentokrát už závislostí jedného parametru na druhom.

Testované konektory sa do teplotnej komory dávali ako súčasť patch (prepojovacích) káblov. Tým, že sa tam nedalo celé vlákno zakončené požadovaným konektorom sa do istej miery zaručilo, že teplota bude mať vplyv len na časti, ktoré sú umiestnené vo vnútri komory. Je dobré vedieť, že do prístroja EXFO sa použilo predradné



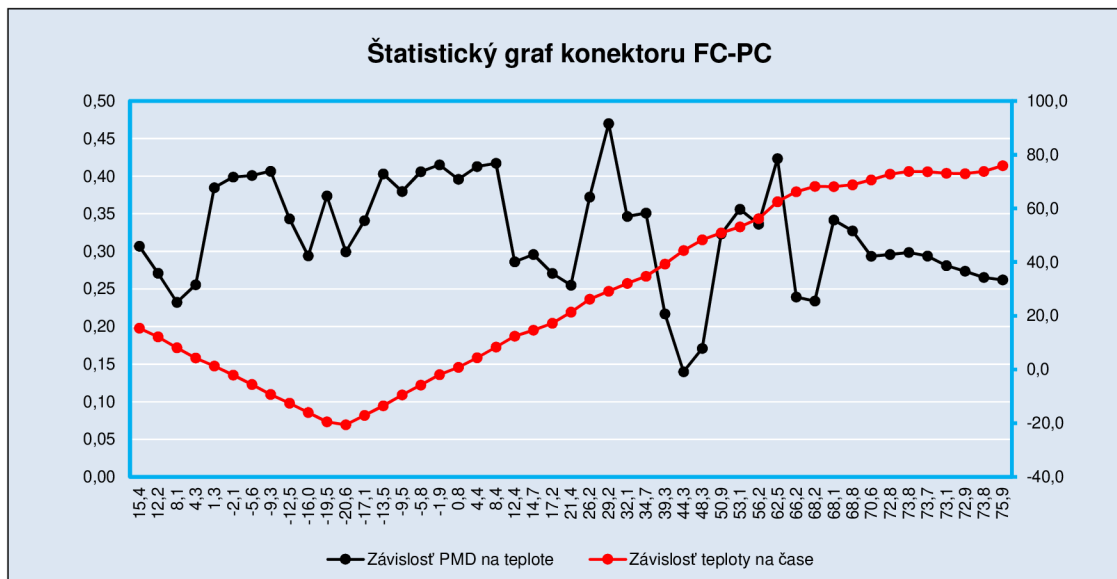
vlákno, ktoré bolo ale mimo komoru (ako už bolo spomínané kvôli tzv. mŕtvej zóne). Keďže každý test sa menil len konfiguráciou vo vnútri komory, môžeme teda povedať, že namerané a grafické výsledky sú výsledkom vplyvu teploty na daný prvok (keďže každý test mal rovnaké podmienky). Namerané hodnoty všetkých prvkov môžeme vidieť v prílohách **Príloha 4 - 13**. Z tabuľkových hodnôt boli určené grafické závislosti. Grafy závislosti teploty na čase mali v konečnom dôsledku zhodný priebeh ako to bolo v nastavených etalónoch ktoré sú v kapitole 6.5 na strane 85. Zo začiatku teplota klesala z ustálenej hodnoty na okolo -20 stupňov a potom začala stúpať zhruba do +76 °C. Grafy PMD hodnoty na teplote a PMD hodnoty na čase boli totožné v každom jednom meraní. Je to očakávané, keďže hodnota PMD sa zapisovala v určitom čase podľa ktorého sa potom určila teplota v tom istom čase. Zo štyroch grafov sa zhotovil jeden výsledný, ktorý zachytáva všetky spomínané. V nasledujúcej časti budú prehľadne uvedené grafy pre jednotlivé merané prvky.

## Konektor SC-PC



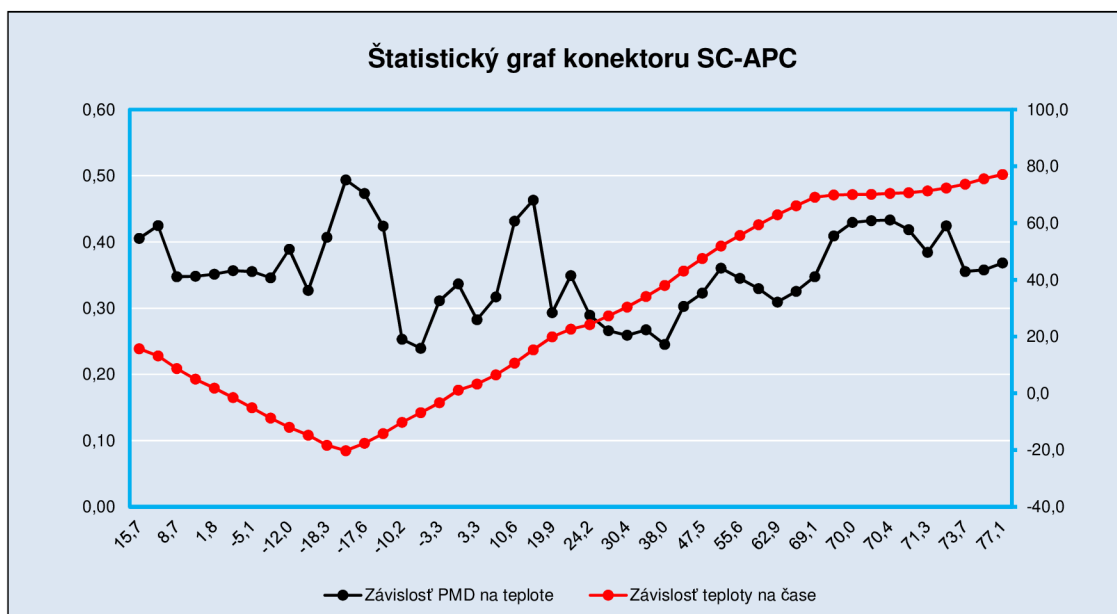
Obr. 6.28: Štatistický graf konektor SC-PC.

## Konektor FC-PC



Obr. 6.29: Štatistický graf konektor FC-PC.

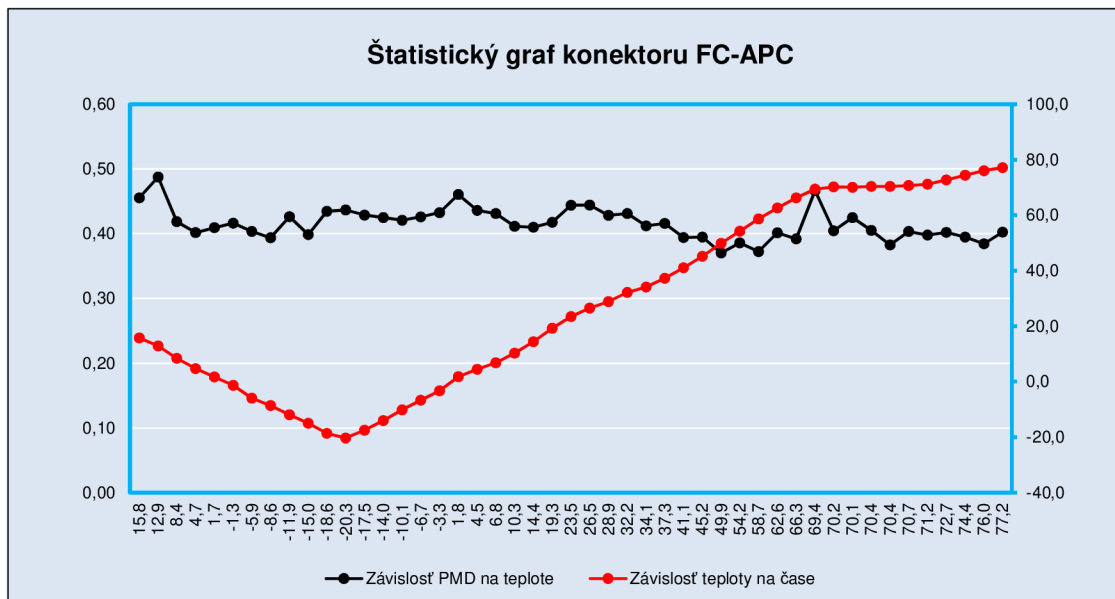
## Konektor SC-APC



Obr. 6.30: Štatistický graf konektor SC-APC.

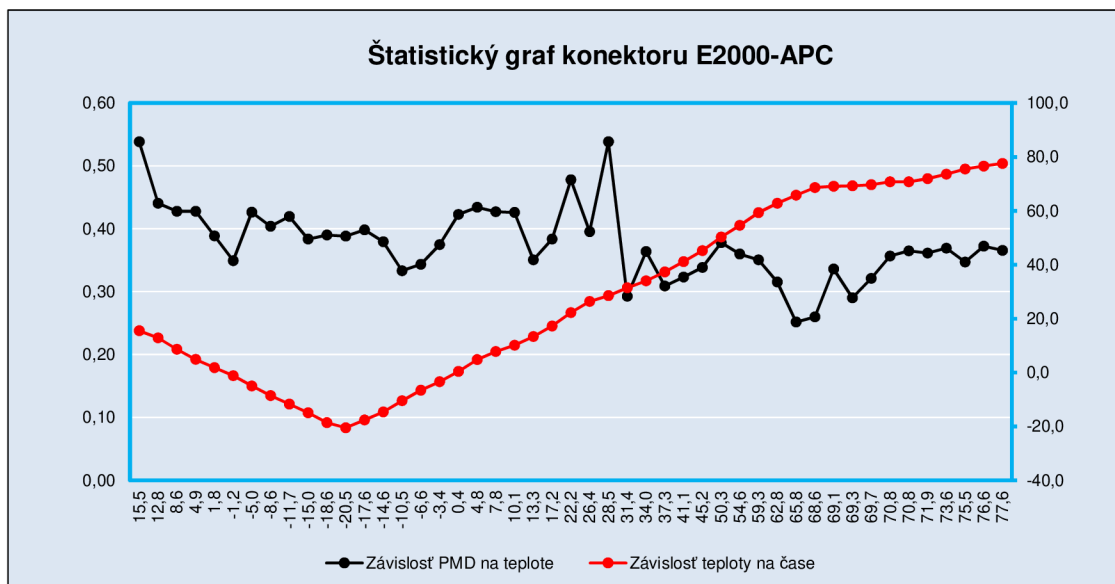


## Konektor FC-APC



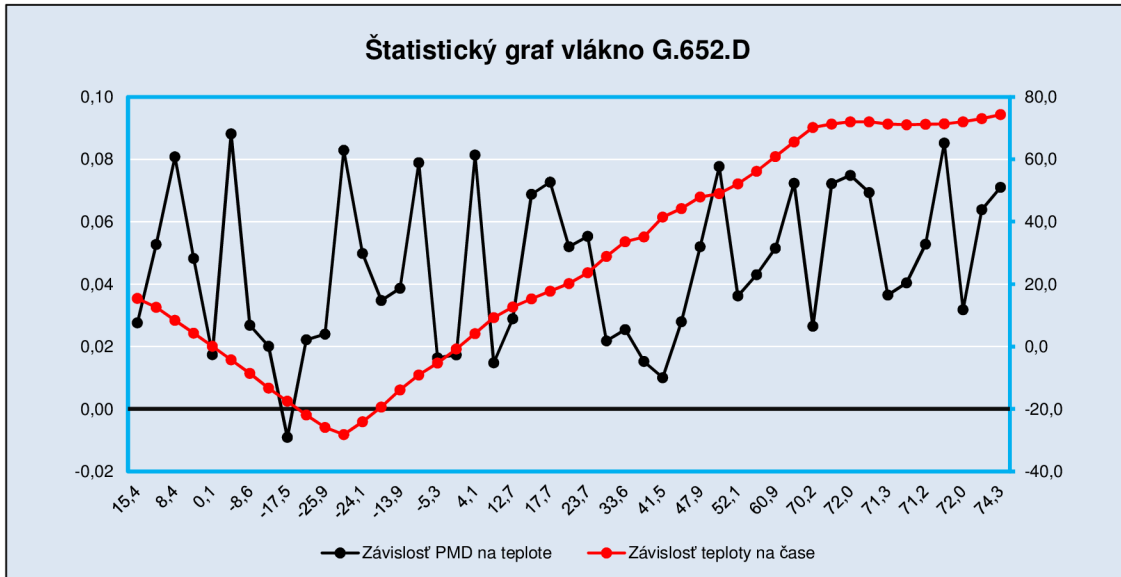
Obr. 6.31: Štatistický graf konektor FC-APC.

## Konektor E2000-APC



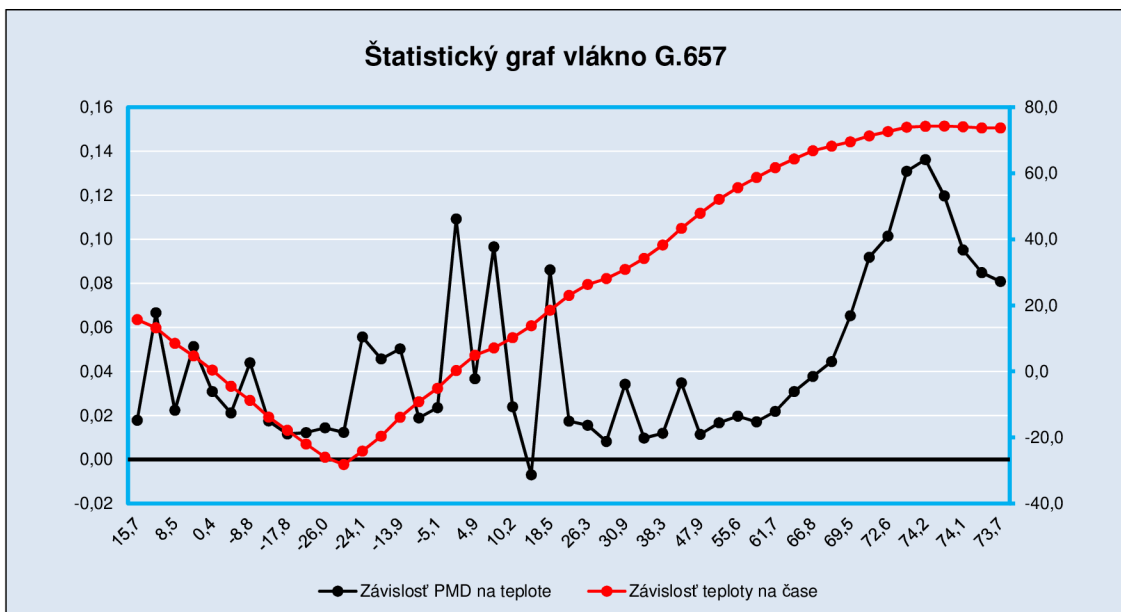
Obr. 6.32: Štatistický graf konektor E2000-APC.

## Vlákno G.652.D



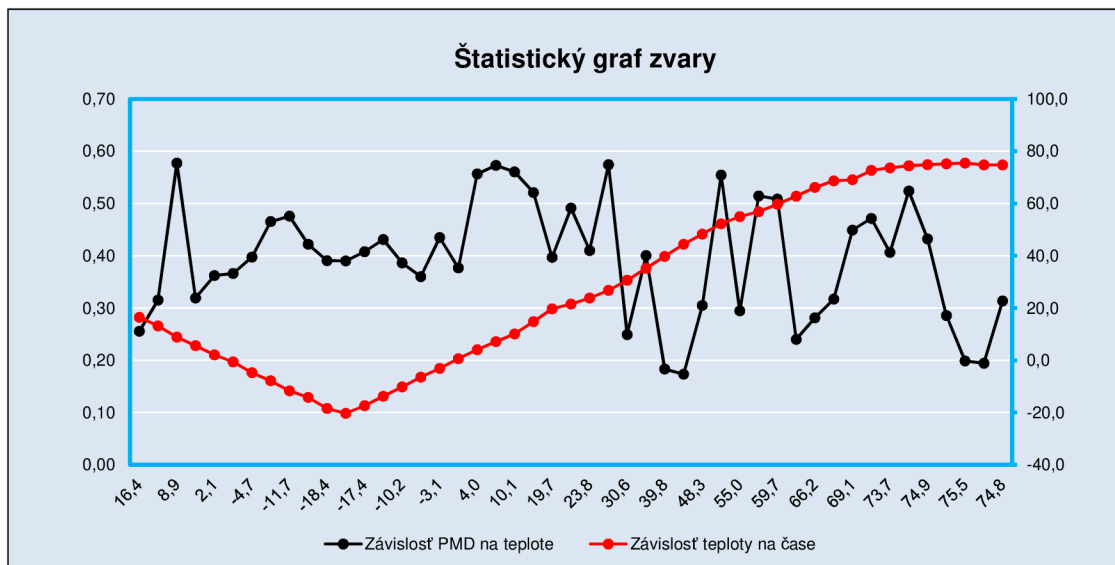
Obr. 6.33: Štatistický graf vlákna G.652.D.

## Vlákno G.657



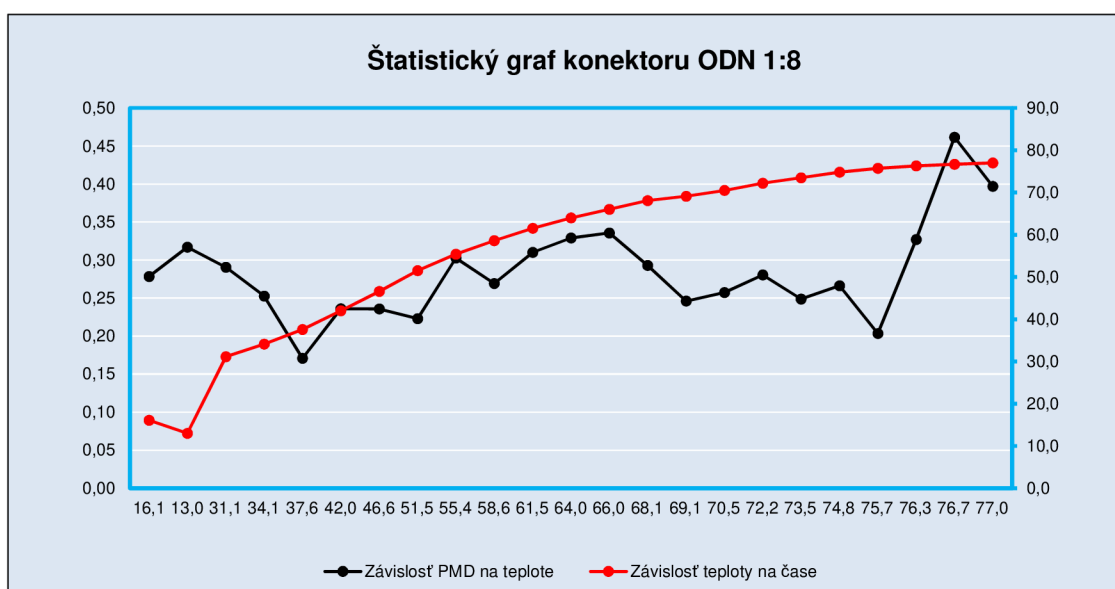
Obr. 6.34: Štatistický graf vlákno G.657.

## Zvary na vlákne



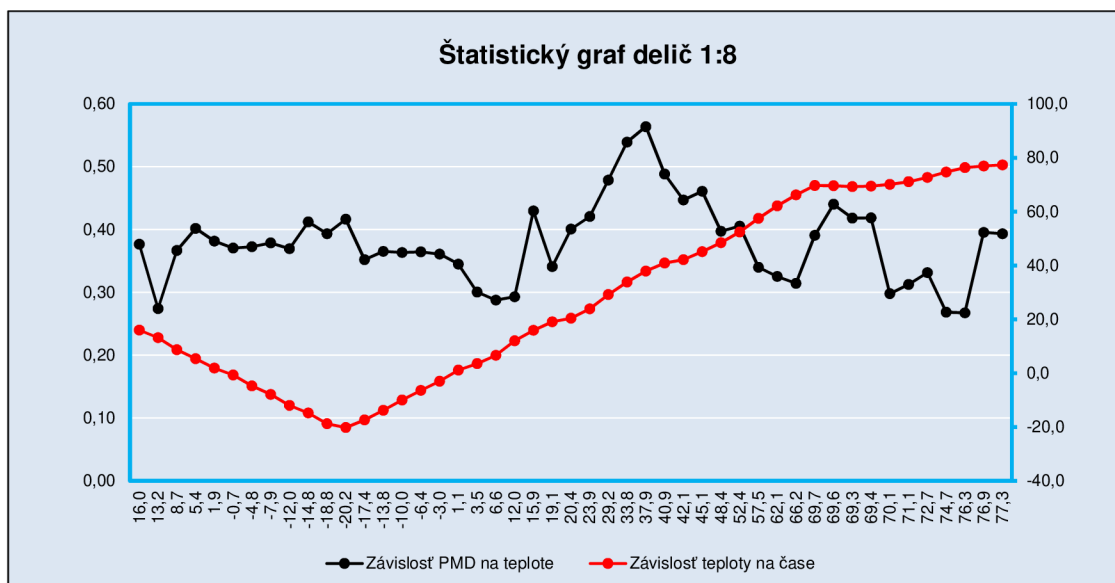
Obr. 6.35: Štatistický graf pre zvary.

## Optická distribučná sieť



Obr. 6.36: Štatistický graf pre ODN.

## Delič 1:8



Obr. 6.37: Štatistický graf pre delič.

## 6.7 Zhodnotenie meraní

Merania v teplotnej komore sa uskutočnili za predpokladu dopadu vplyvu teploty nielen na samotné optické vlákno ale aj samotné časti potrebné k vybudovaniu optickej trasy. Graf závislosti teploty na čase mal priebeh ako v nastavenom etalóne pre každé meranie. Všetky tieto závislosti vykazovali rovnaký priebeh krivky, čo sa nedá povedať o závislosti samotnej PMD na teplote alebo čase, kde všetky grafy mali rôzny priebeh.

Priebeh konektoru SC-PC sa trochu javil, že pokiaľ teplota klesala (komora sa ochladzovala) tak bolo vidno ako klesá aj hodnota PMD a naopak, keď sa začala teplota zvyšovať tak mierne stúpala (uvažované pri vypustení extrémnych hodnôt). Na obr. 6.38 je nakreslené možné klesanie žltou úsečkou a modrou naopak mierne stúpanie.

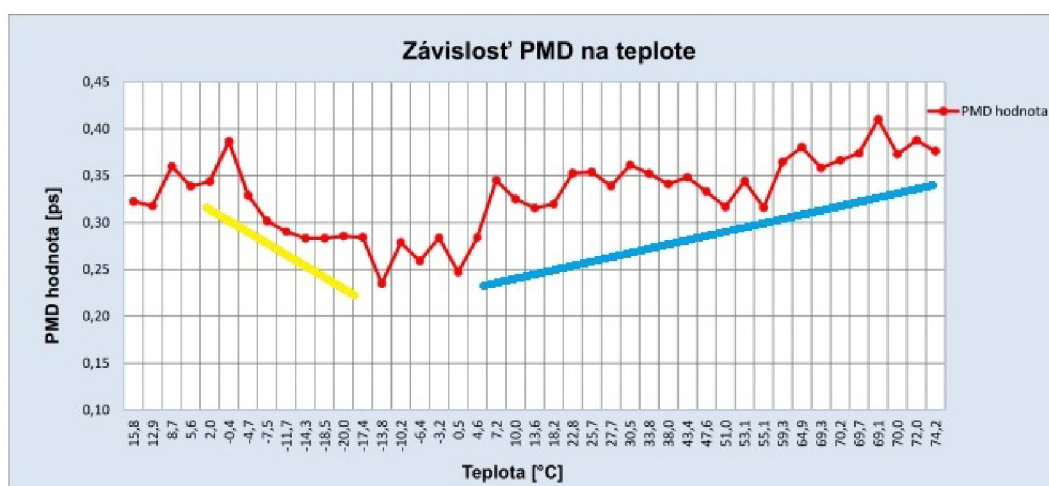
Konektor FC-PC mal viacero extrémov, ale pri dlhšom analyzovaní grafu sa dospelo k záveru, že časť grafu prejavila stúpajúci charakter a časť klesajúci. Stúpajúci charakter sa prejavil v hodnotách kedy sa komora ochladzovala (modrá úsečka) a klesajúci (žltá úsečka) naopak tam, kde hodnota teploty stúpala viac na obr. 6.39.

Konektor SC-APC mal takisto viaceré extrémny. Uvažoval som teda opäť o stave bez extrémnych hodnôt a zostrojil som graf, ktorý vykazuje klesajúci charakter (žltá úsečka) pri ochladzovaní komory a stúpajúci charakter (modrá úsečka od asi 30 °C viac obr. 6.40.

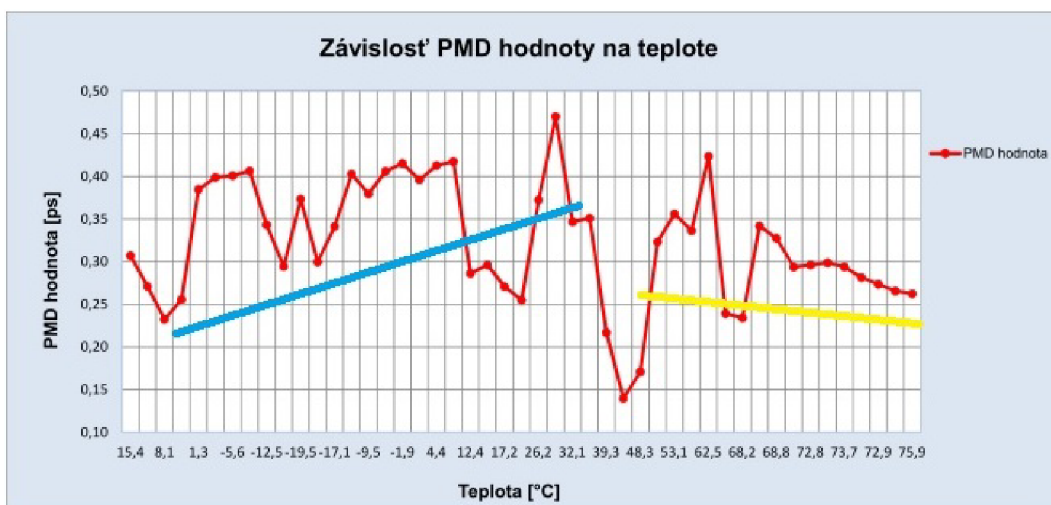
Pri konektore FC-APC bol priebeh opäť nejasný. Niektoré hodnoty mali klesajúci charakter a iné stúpajúci charakter preto aj keď budeme uvažovať o vypustení extrémov nebudeme vidieť, tak ako v predošlých grafoch uvažované súvislé klesanie a stúpanie hodnôt.

Konektor E2000-APC ako sme mohli vidieť má bez extrémov väčšiu časť klesajúcu a asi od 68 °C začína mierne stúpať. Opäť je to vyznačené na obr. 6.41, kde žltá úsečka je klesanie a modrou je vyznačené stúpanie.

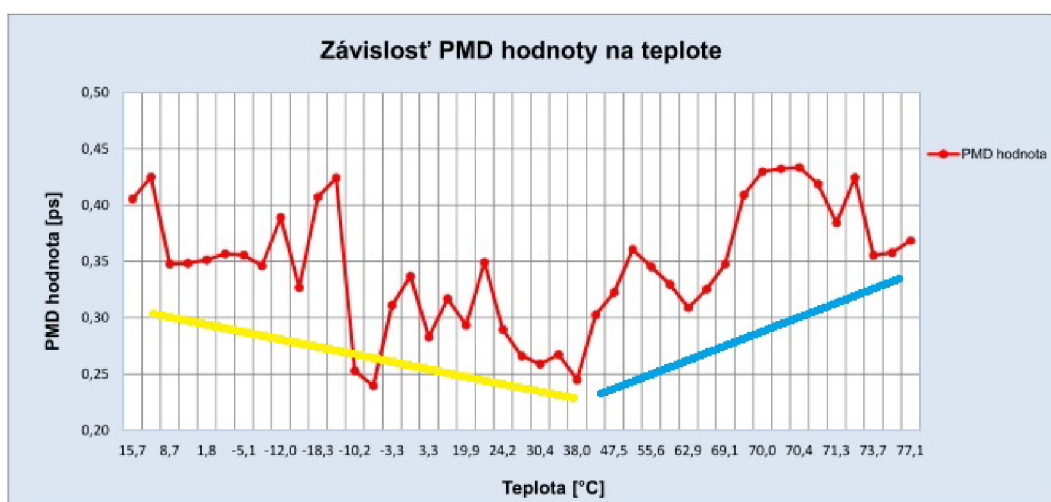
Grafy pri vláknoch G.652.D a G.657 boli striedavé hodnoty „hore-dole“, takže nemusíme uvažovať o žiadnom vypustení extrémnej hodnoty. Pri vlákne G.657 od 55,6 °C môžeme pozorovať prudký nárast hodnoty PMD. Tento istý scenár, kde sa striedali hodnoty „hore-dole“ bol aj u grafov pre zvary, ODN a delič 1:8. Treba poznamenať, že pri ODN v pomere 1:8 boli hodnoty namerané v menšom rozsahu než u ostatných meraní. Zo začiatku boli odmerané dve hodnoty a potom po 6 hodinách začalo merať ďalšie. Keďže bol test pustený na 12 hodín, mohlo sa stať, že došlo k zamrznutiu prístroja alebo k nezapísaniu hodnôt do súboru. Hodnoty PMD koeficientu neboli do grafického spracovania zahrnuté pretože mali rovnaký priebeh ako grafy s PMD hodnotou. Aj keď sme sa snažili pri niektorých grafoch odstrániť extrémny a naškrtnúť klesajúcu a stúpajúcu tendenciu krivky podľa teploty išlo o nami uvažované priebehy ako by to mohlo vyzerieť. Je viacmenej vidno v každom z grafov meraného prvku, že jednoznačne nevidno monotónne klesanie (pri ochladzovaní komory) a stúpanie PMD hodnôt (pri otepľovaní komory) podľa teploty. Z grafických výsledkov môžeme usúdiť, že PMD je javom náhodným a nedá sa mu predísť, obzvlášť pri takej hodnote ako je teplota, ktorá ako vidíme mení hodnotu PMD rôzne v celom rozsahu teplôt.



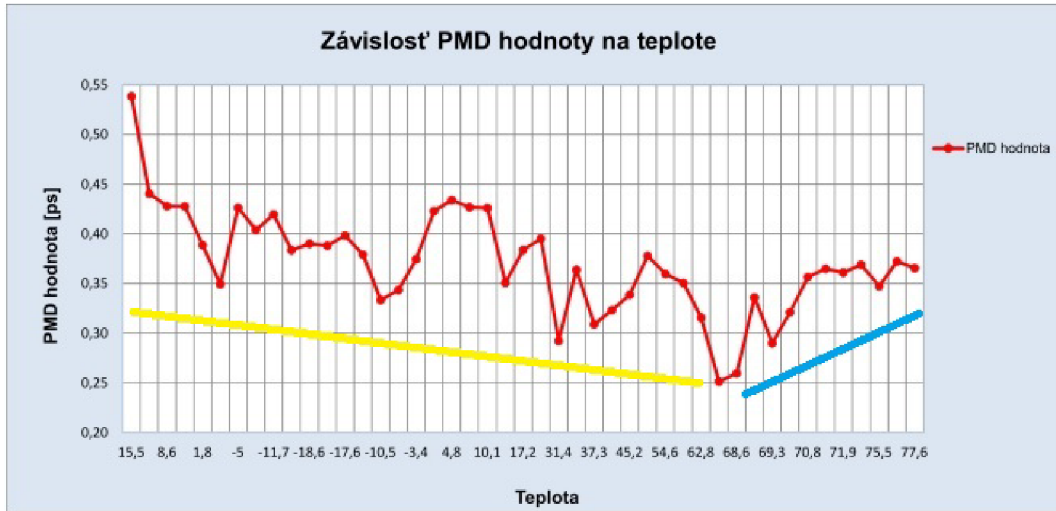
Obr. 6.38: Konektor SC-PC bez extrémov.



Obr. 6.39: Konektor SC-PC.



Obr. 6.40: Konektor SC-APC bez extrémov.



Obr. 6.41: Konektor E2000-APC bez extrémov.

## 7 ZÁVER

Disperzie ovplyvňujú a degradujú výsledný signál. Potreba merania disperzie je preto nevyhnutná. Zvlášť je potrebné merať chromatickú disperziu v DWDM systémoch, kde sa niekoľko spektrálnych zložiek šíri rôznou rýchlosťou. Nie každá zložka sa dostane na výstup bez časového rozťahnutia impulzu. Posunutiu impulzu sa snažíme za každú cenu vyvarovať, pretože nám to predstavuje samotné skreslenie informácie. Preto každý správca pri inštalovaní optickej trasy sa snaží zapojiť trasu tak aby tam nedošlo k žiadnej chybe. Na inštalovanie trasy je nutné pozerať sa zo strany faktorov, ktoré budú vlákno ovplyvňovať. Tlak, ťah, skrut samotného vlákna či nesprávne nainštalovanie trasy podnecuje vznik polarizačnej vidovej disperzie. Nielen tieto faktory ovplyvňujú jej chovanie na prenášaný signál, ale aj teplota okolia do akého je vlákno inštalované. V praxi správny postup providerov, či už metropolitných optických sietí alebo prístupových optických sietí by mal pozostávať v pravidelnom premeriavaní optickej trasy. Vyškolení technici pre meranie parametrov degradujúcich signál v optickom vlákne používajú meracie analyzátory pomocou ktorých vedú zistiť hodnotu disperzie, chybu na trase a následne ju eliminovať.

V prvej polovici praktickej časti som sa preto zameril na analyzátory, ktoré využívajú rôzne metódy pre meranie disperzií, konkrétne PMD. Merania prebiehali podľa predom navrhnutých topológií. Každý analyzátor meral rovnaké trasy. Každá trasa sa merala pre presnosť trikrát. Meralo sa štýlom z jedného konca, čo znamená, že na začiatku bol analyzátor a na konci bola trasa ukončená konektorom.

Metóda skenovania vlnových dĺžok vykazovala zreteľné odchýlky štandardnej odchýlky PMD hodnoty od štandardnej odchýlky analyzátora. Odchýlky boli očakávané, keďže sa do výpočtu zahrňovala hodnota emulátora a analyzátora. Graf tolerančného pásma ukázal, že všetky merania vyhovujú pre tolerančný pás. Pri interferometrickej metóde GINTY odchýlka nastala už od prvých testov pre štandardnú odchýlku analyzátora od štandardnej odchýlky PMD hodnoty. Odchýlka závisela od hodnôt zadaných výrobcom analyzátora a emulátora. Všetky hodnoty ležali vo vnútri tolerančného pásma a teda sú vyhovujúce.

Druhý analyzátor využíval metódu skramblovania polarizačných stavov SSA. Štandardná odchýlka analyzátora od štandardnej odchýlky PMD hodnoty sa od začiatku zväčšila oproti predošlému meraniu. Záviselo to opäť od tabulkových hodnôt daných výrobcom. Graf tolerančného pásma vyhovoval pre všetky hodnoty. V oboch prípadoch rozdiel medzi štandardnou odchýlkou analyzátora od štandardnej odchýlky PMD hodnoty závisel na hodnotách zadaných výrobcom, preto grafy ilustrovali len odchýlku medzi samotnými odchýlkami analyzátora a PMD hodnoty.

V spoločnom porovnaní nevykazovala ani jedna meracia metóda markantné odchýlky, ktoré by nám jednoznačne nadradovali jednu metódu nad druhou. Po celú dobu testovania sa to striedalo a vidieť minimálne rozdiely. Pokiaľ by sme chceli



uprednostniť jeden z týchto prístrojov, určite by sme mali brať do úvahy okrem presnosti merania aj samotnú dobu merania. Najdlhšie meranie vychádzalo pre metódu skenovania vlnových dĺžok oproti GINTY a SSA.

Druhá časť sa zamerala na ovplyvňujúci faktor PMD – teplotu. Z dôvodu, že nie všade na svete sú klimatické podmienky rovnaké a vlákno musí koľko krát preukázať svoju odolnosť voči nim s dopadom na kvalitu prenosu. Pomocou teplotnej komory sa nasimulovali teploty od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+76\text{ }^{\circ}\text{C}$  pre pasívne prvky optickej siete. Z grafických výsledkov je jasne vidieť, že u každého prvku pri rovnakom teplotnom rozsahu mala PMD rozličnú hodnotu a celkovú krivku. Aj keď sa v niektorých prípadoch odstránili extrémny a bola snaha načrtnúť klesajúcu a stúpajúcu tendenciu hodnôt bolo stále vidno, že sú hodnoty PMD rôzne pri každej teplote.

Na záver tohoto treba vychádzať z faktu, že je potrebné aby vlákno bolo inštalované do trasy aby bol vplyv nielen teploty ale aj ostatných faktorov na prenos čo najmenší. Pokiaľ merať trasu tak ju merať na viacej krát aby sa dosiahla vyššia presnosť na stanovenie záverov čo bude s vláknom alebo s celou trasou ďalej.

# LITERATÚRA

- [1] DADO, Milan, Ivan TUREK, Július ŠTELINA, Ladislav BITTERER, Stanislav TUREK, Eduard GROMULUS a Patrick STIBOR. *Kapitoly z optiky* [online]. 1998. vyd. Žilina: EDIS-Žilinská univerzita, 1998, 348 s. [cit. 2014-10-03]. ISBN 80-7100-390-5. Dostupné z: <[http://katalog.utc.sk/e-books/books/pdf/Dado\\_Milan\\_\\_Kapitoly\\_z\\_optiky/kapitoly\\_z\\_optiky.pdf](http://katalog.utc.sk/e-books/books/pdf/Dado_Milan__Kapitoly_z_optiky/kapitoly_z_optiky.pdf)>
- [2] Grupová rýchlosť. In: *Wikipedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 30.8.2012 [cit. 2014-10-03]. Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Grupov%C3%A1\\_rychlost](http://cs.wikipedia.org/wiki/Grupov%C3%A1_rychlost)>
- [3] PROVAZNÍK, Jakub. *Simulace a měření na optické trase* [online]. Pardubice, 2012 [cit. 2014-10-03]. Dostupné z: [http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/46606/1/ProvaznikJ\\_SimulaceMereni\\_LS\\_2012.pdf](http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/46606/1/ProvaznikJ_SimulaceMereni_LS_2012.pdf). Bakalárska práca. Univerzita Pardubice - Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Ladislav Štěpánek.
- [4] OPTIPEDIA: Material Dispersion. HARRINGTON, James. *SPIE* [online]. [cit. 2014-10-03]. Dostupné z: <<http://spie.org/x33587.xml>>
- [5] *Encyclopaedia Beliana: slovenská všeobecná encyklopédia v dvanástich zväzkoch*. 1. vyd. Bratislava: Encyklopedický ústav Slovenskej akadémie vied, 1999-2010, 696 s. ISBN 80-224-0554-X. číslo publikácie 3259. Kapitola A, s.18.
- [6] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [7] DISPERSION. *Tpub* [online]. [cit. 2014-10-04]. Dostupné z: <<http://www.tpub.com/neets/tm/106-15.htm>>
- [8] What is Optical Fiber Dispersion?. *Fiberoptics4sale* [online]. 8.2.2009 [cit. 2014-10-04]. Dostupné z: <<http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/what-is-optical-fiber-dispersion/>>
- [9] Chromatic dispersion (optics). In: *Chromatic dispersion (optics)*[online].[cit. 2014-10-04]. Dostupné z: <[http://www.fiberoptic.com/Fiber\\_Characterization/pdf/chromatic\\_dispersion.pdf](http://www.fiberoptic.com/Fiber_Characterization/pdf/chromatic_dispersion.pdf)>
- [10] Dispersion in Optical Fibers. CHAUVEL, Gildas. ANRITSU. *Scribd* [online].[cit. 2014-10-04]. Dostupné z: <<http://www.scribd.com/doc/82277476/Disp-in-Opt-Fibers-PMD-CD>>

- [11] Disperzní parametry SMF optických vláken a tras. In: *Disperzní parametry SMF optických vláken a tras* [online]. [cit. 2014-10-04]. Dostupné z: <[http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/3\\_Disperze%20.pdf](http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/3_Disperze%20.pdf)>
- [12] Měření chromatické a polarizační vidové disperze jednovidových optických tras. HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. Mikrokom [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <<http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/CD-PMDcablex2002.pdf>>
- [13] BROUČEK, Jan. Profiber Networking. *Disperze CD a její měření*. Praha, 2012.
- [14] STIBOR, Patrick. Profiber Networking. *Optical fiber solution: Jednovidová optická vlákna*. Praha, neznáme.
- [15] ŤUPA, Martin, Miloslav FILKA a Oto DOSTÁL. Polarizační vidová disperze – PMD. In: *Polarizační vidová disperze - PMD* [online]. 3.4.2012, 2012 [cit. 2014-10-03]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/polarizacni-vidova-disperze---pmd/>>
- [16] BOHÁČ, Leoš. Disperze optických vláken. In: *Disperze optických vláken* [online]. [cit. 2014-10-03]. Dostupné z: <[http://students.math.slu.cz/jakubchovanec/skola/PCsit/Dalsi/5\\_prednaska.pdf](http://students.math.slu.cz/jakubchovanec/skola/PCsit/Dalsi/5_prednaska.pdf)>
- [17] Typy Braggovských mřížek: uniform, apodized, blazed, schirped. *Opte.imatte: Optoelektronika v telekomunikacích a senzorce* [online]. 27.2.2012 [cit. 2014-10-03]. Dostupné z: <<http://opte.imatte.cz/index.php/teorie/fbg-mrizky/15-typy-braggovskych-miek>>
- [18] OTHONOS, Andreas a Kyriacos KALLI. *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing* [online]. Boston, Mass.: Artech House, c1999, xiv, 422 p. [cit. 2014-10-03]. ISBN 08-900-6344-3. Dostupné z: <[http://opte.imatte.cz/files/Fiber\\_Bragg\\_Gratings\\_Othonos\\_Kali.pdf](http://opte.imatte.cz/files/Fiber_Bragg_Gratings_Othonos_Kali.pdf)>
- [19] BROUČEK, Jan. Profiber Networking. *Disperze CD a PMD*. Praha, 2012.
- [20] Olson-technology. *Olson-technology* [online]. [cit. 2014-10-04]. Dostupné z: <[http://www.olson-technology.com//Dispersion\\_Compensation.htm](http://www.olson-technology.com//Dispersion_Compensation.htm)>
- [21] Chromatická disperze jednovidových optických vláken a její měření. HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *Mikrokom* [online]. [cit. 2014-10-04]. Dostupné z: <<http://www.mikrokom.eu/sk/pdf/chrom-disperze.pdf>>

- [22] ČERTÍK, Filip. Modulačné techniky v optickom prenosovom médiu. In: ČERTÍK, Filip. *Posterus* [online]. 21. 9 2011, 2011 [cit. 2014-10-04]. ISSN 1338-0087. Dostupné z: <<http://www.posterus.sk/?p=11599>>
- [23] KLESNIL, Ondřej. *PMD - Polarizační vlivy optických vláken: Oprical fibres and their polarization effect* [online]. Brno, 2010 [cit. 2014-10-04]. Dostupné z: <[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28358](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28358)>. Diplomová práca. Vysoké Učení Technické v Brne. Vedoucí práce Miloslav Filka.
- [24] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky: Optoelektronika - optoelektronické prvky a optická vlákna*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 154 s. ISBN 80-730-0184-5.
- [25] Optical fibres, cables and systems. In: *ITU: International Telecommunication Union* [online]. 2009 [cit. 2014-10-04]. Dostupné z: <[http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf)>
- [26] SÝKORA, Jan. Typy a vlastnosti optických vláken. In: SÝKORA, Jan. *Access server* [online]. 28.7.2004, 2004 [cit. 2014-10-04]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072802>>
- [27] BROUČEK, Jan. Profiber Networking. *Disperze CD a její měření*. Praha, 2012.
- [28] BROUČEK, Jan. Profiber Networking. *Měření disperze PMD*. Praha, 2012.
- [29] Nová metoda měření PMD optických kabelových tras. HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *Mikrokom* [online]. [cit. 2014-10-05]. Dostupné z: <<http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/pmd-mereni-tras.pdf>>
- [30] BURČÍK, Jaroslav. Optické komunikace. In: *Comtel* [online]. 2006 [cit. 2014-10-05]. Dostupné z: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=1935>>
- [31] Optická vlákna. *Ofacom: OFA - Optical Fiber Apparatus* [online]. [cit. 2014-10-05]. Dostupné z: <[http://www.ofacom.cz/index.php?option=com\\_weblinks&view=category&id=88&Itemid=110](http://www.ofacom.cz/index.php?option=com_weblinks&view=category&id=88&Itemid=110)>
- [32] JDSU OLT-55 Smart Optical Loss Test Set. *Test Equipment Depot* [online]. Fotronic Corporation, 2014 [cit. 2014-10-05]. Dostupné z: <<http://www.testequipmentdepot.com/jdsu/loss-testers/olt-55.htm>>
- [33] FTB-5500B/FTB-5800: PMD and CD analyzers. In: *EXFO: Telecom test and servis assurance* [online]. Canada: EXFO Inc., 2014 [cit. 2014-10-05]. Dostupné z: [http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification\\_Sheets/EXFO\\_spec-sheet\\_FTB-5500B-5800\\_v4\\_en.pdf](http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXFO_spec-sheet_FTB-5500B-5800_v4_en.pdf)

- [34] MTS-8000 Scalable Multitest Platform. In: *JDSU* [online]. JDS Uniphase Corporation, 2014 [cit. 2014-10-06]. Dostupné z: <[http://www.jdsu.com/en-us/Test-and-Measurement/products/a-z-product-list/Pages/mts-8000.aspx#.VDKyo\\_1\\_tqX](http://www.jdsu.com/en-us/Test-and-Measurement/products/a-z-product-list/Pages/mts-8000.aspx#.VDKyo_1_tqX)>
- [35] T-BERD®/MTS-8000 Scalable Multitest Platform: One solution that expands to more than 40 tests. In: *JDSU* [online]. JDS Uniphase Corporation, 2012 [cit. 2014-10-06]. Dostupné z:<<http://www.jdsu.com/ProductLiterature/T-BERD-MTS-8000-ds-fop-tm-ae.pdf>>
- [36] T-BERD®/MTS-6000, -6000A, and -8000 Platforms: Polarization Mode Dispersion Module. In: *JDSU* [online]. JDS Uniphase corporation, 2009 [cit. 2014-10-06]. Dostupné z:<[http://www.jdsu.com/ProductLiterature/mts-tb\\_pmd\\_ds\\_fop\\_tm\\_ae.pdf](http://www.jdsu.com/ProductLiterature/mts-tb_pmd_ds_fop_tm_ae.pdf)>
- [37] OFS-110 Optical FiberTrace Viewer - V6.84. *JDSU* [online]. JDS Uniphase corporation, 2014 [cit. 2014-10-06]. Dostupné z: <[http://www.jdsu.com/ru-ru/Test-and-Measurement/Products/downloads/Pages/ofs-110-optical-fibertrace-viewer-patch-v6-62.aspx#.VDKPoPl\\_tqX](http://www.jdsu.com/ru-ru/Test-and-Measurement/Products/downloads/Pages/ofs-110-optical-fibertrace-viewer-patch-v6-62.aspx#.VDKPoPl_tqX)>
- [38] Fiber TraceViewer 6.9. *Software Informer* [online]. [cit. 2014-10-09]. Dostupné z:<<http://fiber-traceviewer.software.informer.com/6.9/>>
- [39] Telecom test and service assurance. Platform — FTB-500: *EXFO: Telecom Test and Service Assurance* [online]. EXFO Inc., 2014 [cit. 2014-10-09]. Dostupné z: <<http://www.exfo.com/products/field-network-testing/bu6-ftb-ecosystem/platforms/ftb-500>>
- [40] FTB-500 Platform: BOUNDLESS CAPABILITIES, TESTING UNLIMITED. In: *EXFO: Telecom Test and Service Assurance* [online]. Canada: EXFO Inc., 2014 [cit. 2014-10-09]. Dostupné z: <[http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification\\_Sheets/EXFO\\_spec-sheet\\_FTB-500-v11\\_en.pdf](http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXFO_spec-sheet_FTB-500-v11_en.pdf)>
- [41] PMD Analyzer - FTB-5500B. *EXFO: Telecom Test and Service Assurance* [online]. EXFO Inc., 2014 [cit. 2014-10-09]. Dostupné z:<<http://www.exfo.com/products/field-network-testing/bu3-optical/dispersion-analysis/ftb-5500b>>
- [42] FTB-5500B/FTB-5800: PMD AND CD ANALYZERS. In: *EXFO: Telecom Test and Service Accuracy* [online]. Canada: EXFO Inc., 2014 [cit. 2014-10-09]. Dostupné z: <[http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification\\_Sheets/EXFO\\_spec-sheet\\_FTB-5500B-5800\\_v4\\_en.pdf](http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXFO_spec-sheet_FTB-5500B-5800_v4_en.pdf)>

- [43] Měřidlo polarizační vidové disperze EXFO FTB-5500B. *PROFiber Networking*[online]. PROFIBER, s.r.o., 2010 [cit. 2014-10-09]. Dostupné z:<<http://www.profiber.eu/Meridlo-polarizacni-vidove-disperze-EXFO-FTB-5500B/>>
- [44] Zdroj Záření EXFO FLS-5800A. In:*PROFiber Networking*[online]. PROFIBER, s.r.o., 2010 [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: <<http://www.profiber.eu/Zdroj-Zareni-EXFO-FLS-5800A/>>
- [45] FLS-5834A: CD/PMD ANALYZER SOURCE. In: *EXFO: Telecom Test and Service Accuracy* [online]. Canada: EXFO Inc., 2012 [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: <[http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification\\_Sheets/EXFO\\_spec-sheet\\_FLS-5800\\_v3\\_en.pdf](http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXFO_spec-sheet_FLS-5800_v3_en.pdf)>
- [46] EXFO FTB200-V2-S1: Modular Test Platform Mainframe 2-slot. *Electro Rent: Part of Electro Rent Corporation* [online]. Electro Rent Corporation, [cit. 2014-10-09]. Dostupné z: <<http://www.electrorent.com/products/details/exfo/ftb200-v2-s1>>
- [47] Kompaktní měřící platforma EXFO FTB-200 V2. *Profiber* [online]. [cit. 2014-09-10]. Dostupné z: <<http://www.profiber.eu/Kompaktni-merici-platforma-EXFO-FTB-200-V2/>>
- [48] Compact Platform — FTB-200. *EXFO: Telecom Test and Service Assurance* [online]. EXFO Inc., 2014 [cit. 2014-10-09]. Dostupné z:<<http://www.exfo.com/products/field-network-testing/bu6-ftb-ecosystem/platforms/ftb-200>>
- [49] FTB-5700 Single-Ended Dispersion Analyzer: AUTOMATED CD AND PMD MEASUREMENTS IN ONE EASY-TO-USE MODULE. In: *EXFO: Telecom Test and Service Assurance* [online]. EXFO Inc., 2014 [cit. 2014-10-09]. Dostupné z:<[http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification\\_Sheets/EXFO\\_spec-sheet\\_FTB-5700-v11\\_en.pdf](http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXFO_spec-sheet_FTB-5700-v11_en.pdf)>
- [50] ŠIFTA, Radim, Petr MÜNSTER a Miloslav FILKA. Měřící pracoviště CD/PMD. Brno, 2013.
- [51] Single-Ended Dispersion Analyzer — FTB-5700. *EXFO: Telecom Test and Service Assurance* [online]. EXFO Inc., 2014 [cit. 2014-10-09]. Dostupné z:<<http://www.exfo.com/products/field-network-testing/bu3-optical/dispersion-analysis/ftb-5700>>

- [52] Single-Ended Dispersion Analyzer — FTB-5700. *EXFO: Telecom Test and Service Accuracy* [online]. PROFIBER, s.r.o., 2010 [cit. 2014-10-09]. Dostupné z: <[http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification\\_Sheets/EXFO\\_spec-sheet\\_FTB-5700-v12\\_en.pdf](http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXFO_spec-sheet_FTB-5700-v12_en.pdf)>
- [53] Měřidlo polarizační vidové a chromatické disperze EXFO FTB-5700. *PROFiber Networking* [online]. PROFIBER, s.r.o., 2010 [cit. 2014-10-09]. Dostupné z: <<http://www.profiber.eu/Meridlo-polarizacni-vidove-a-chromaticke-disperze-EXFO-FTB-5700/>>
- [54] FastReporter 2. *EXFO: Telecom Test and Service Assurance* [online]. [cit. 2014-10-09]. Dostupné z: <<http://www.exfo.com/software/exfo-apps/fastreporter-2?platform=PC>>
- [55] PMD Issues in Advanced, Very High-Speed Networks. In: *Computer Controls: Components, Instruments, Telecom* [online]. Canada: EXFO Inc., 2012 [cit. 2014-10-11]. Dostupné z: <[http://www.ccontrols.ch/cms/upload/content/aktionen/PDF/EXFO\\_Reference-Guide-PMD.ang-V2LR.PDF](http://www.ccontrols.ch/cms/upload/content/aktionen/PDF/EXFO_Reference-Guide-PMD.ang-V2LR.PDF)>
- [56] ŠÍMA. Optické síte: Vlákenná optika. In: *Klfree* [online]. [cit. 2014-10-27]. Dostupné z: <[http://www.klfree.net/store/skoleni\\_optika\\_2008\\_klfree\\_2.pdf](http://www.klfree.net/store/skoleni_optika_2008_klfree_2.pdf)>
- [57] Strukturovaný kabelážní systém: optická kabeláž příručka. In: *Variant* [online]. [cit. 2014-10-27]. Dostupné z: <[http://www.variant.cz/soubory-ve-skladu/Karty/Spol\\_Zarazene/01-MANU%C3%81LY%20CS/SKS%20prirucka%20optika%20-%20man-a4.pdf](http://www.variant.cz/soubory-ve-skladu/Karty/Spol_Zarazene/01-MANU%C3%81LY%20CS/SKS%20prirucka%20optika%20-%20man-a4.pdf)>
- [58] DIPOL Weekly Review - TV and SAT TV, CCTV, WLAN. In: *Dipol* [online]. Feb. 11, 2013: DIPOL Sp.J., 2013 [cit. 2014-10-27]. Dostupné z: <[http://www.dipol.ie/newsletter2/inf\\_dipo\\_2013\\_07.html](http://www.dipol.ie/newsletter2/inf_dipo_2013_07.html)>
- [59] Building icons. *Flaticon* [online]. 2013-2014 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: <[http://www.flaticon.com/free-icons/building\\_754](http://www.flaticon.com/free-icons/building_754)>
- [60] Fixed-PMD Emulators — EM-550 and EM-551. *EXFO: Telecom Test and Service Assurance* [online]. EXFO Inc., 2014 [cit. 2014-10-27]. Dostupné z: <<http://www.exfo.com/products/rdmanufacturing-testing/bu3-optical/polarization-analysis/em-550-em-551>>
- [61] MOTÚZ, R.; FILKA, M.; ŠIFTA, R. Chromatická a polarizační módová disperzia v optických sieťach. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<<http://www.elektrorevue.cz>>). [cit. 2014-10-30]. 2013, roč. 15, č. 5, s. 326-332. ISSN: 1213- 1539.

- [62] STDEV, funkcia. In: *Microsoft: Office* [online]. [cit. 2014-10-29]. Dostupné z: <<http://office.microsoft.com/sk-sk/excel-help/stdev-funkcia-HP010335660.aspx>>
- [63] Funkcia, VARA. In: *Microsoft: Office* [online]. [cit. 2014-10-29]. Dostupné z: <<http://office.microsoft.com/sk-sk/windows-sharepoint-services-help/funkcia-vara-HA001161095.aspx?CTT=1>>
- [64] VT<sup>3</sup>/VC<sup>3</sup>. *Vöťch a schunk company* [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <[http://www.v-it.com/en/products/temperature\\_and\\_climate\\_test\\_chambers/schunk01.c.59549.en?\\_pid=51961](http://www.v-it.com/en/products/temperature_and_climate_test_chambers/schunk01.c.59549.en?_pid=51961)>



## ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

$\Delta t$	časová oblasť
$\Delta_\tau$	diferenciálne skupinové oneskorenie
$\Delta_{sk}$	rozdiel skupinového indexu lomu jadra a vlákna
$\Delta t_{vid}$	časová oblasť vidu
$\Delta\lambda$	šírka pásma
$\lambda$	vlnová dĺžka
$\lambda_{broad}$	celkové vlnové dĺžky
$\lambda_B$	braggovská vlnová dĺžka
$\lambda_W$	šírka spektrálnej čiary zdroja
$\omega$	uhlová (kruhová) frekvencia
$\omega_0$	nosná frekvencia
$\partial_\beta$	parciálna derivácia fázovej rýchlosti
$\partial_\omega$	parciálna derivácia uhlovej frekvencie
$\beta(\omega)$	fázová konštanta
$\beta$	konštanta šírenia
$\tau_{sk}$	skupinové oneskorenie
$\pi$	Ludolfovo číslo (3,14159)
$\vartheta$	uhol vychýlenia
$\epsilon$	epsilon
$\Lambda$	mriežková doba
$\mu m$	micrometre – mikrometer
$A$	amplitúda
$a$	polomer jadra
atď	a tak ďalej

APC	angle point contact – uhlový fyzický kontakt
$A_{\text{eff}}$	effective area – efektívny prierez vlákna [ $\mu\text{m}$ ]
B	prenosová rýchlosť
Bit	prenosová rýchlosť
cos	kosínus
$c$	rýchlosť svetla v materiálovom médiu
cm	centimeter
$c_0$	rýchlosť svetla vo vákuu
CD	chromatická disperzia
CWDM	coarse wavelength-division multiplexing – hrubý vlnový multiplex
dB	decibel
$d_n$	derivácia indexu lomu
$d_\lambda$	derivácia vlnovej dĺžky prostredia
$d_z$	derivácia súradnice miesta
$d_\omega$	derivácia uhlovej frekvencie
$d_t$	derivácia času
$d_k$	derivácia vlnového vektora
$d_f$	derivácia frekvencie
$d\tau_{\text{sk}}$	derivácia skupinového oneskorenia
$dt_g$	derivácia zmeny skupinového oneskorenia
$dt_s$	derivácia časového oneskorenia
DCF	dispersion-compensating fiber – disperzné kompenzačné vlákno
DGD	differential group delay – diferenciálne skupinové oneskorenie
DWDM	dense wavelength-division multiplexing – hustý vlnový multiplex
DFB	distributed feedback laser – distribuovaný spätnoväzobný laser
DFE	decision-feedback equalizer – nelineárny spätnoväzobný kompenzátor

$D_{ch}$	koeficient chromatickej disperzia
D	chromatická disperzia
DML	directly modulated laser – priamo modulovaný laser (zdroj)
EDFA	erbium doped fiber amplifier – erbiom dotovaný optický zosilňovač
EML	external modulated laser – externe modulovaný laser (zdroj)
EIA	electronic industries aliance – priemyselná elektronická aliancia
$f$	frekvencia
FEC	forward error correction – kontrola chýb pri prenose dát
FC	flat contact – rovný konektor
FUT	fiber under test – merané vlákno
FFT	fast Fourier transformation – rýchla Fourierova transformácia
FBG	fiber bragg gattting – vlákno s braggovskou mriežkou
FB	fiber channel – vysokorýchlostná prenosová technológia
$GeO_2$	oxid germaničitý
G	Giga – giga
GHz.km	GigaHertz times kilometre – GigaHertz krát kilometer
Gbit/s	Gigabit per second – gigabit za sekundu
Hz	Hertz – Hertz
HOM	higher-order mode – vyšší rád režimu
ITU-T	international telecommunication union – medzinárodná telekomunikačná únia
iOLM	intelligent optical link mapper – inteligentný optický mapovač trasy
IEC	international electrotechnical commission – medzinárodná elektrotechnická komisia
$k$	vlnový vektor
$k_0$	nulový vlnový vektor

km	kilometre – kilometer
K	vlnový vektor dopadajúceho svetla
$k_i$	vlnový vektor mriežky
$k_f$	vlnový vektor rozptýleného žiarenia
$L, l$	dĺžka optického vlákna
LED	light-emitting diode – svetlo-emitujúca dióda
LMS	least mean square – najmenší štvorec
m/s	metre per second – metre za sekundu
M	mega – mega
MHz.km	MegaHertz times kilometre – MegaHertz krát kilometer
MFD	mode field diameter – priemer vidového poľa [ $\mu\text{m}$ ]
Mbit/s	megabit za sekundu
m	meter
max.	maximálne, maximum
$n$	index lomu prostredia
nm/cm	nanometer na centimeter
$n_{sk}, n_s$	skupinový index lomu
$n_1$	index lomu jadra
$n_2$	index lomu plášťa
NA	numerická apertúra
nm	nanometre – nanometer
NZDF	non-zero dispersion fibre – nenulové disperzné vlákno
napr	napríklad
OLM	optical link mapper – optický mapovač trasy
OTDR	optical time-domain reflectometer – reflektometrická metóda
OSA	optical spectrum analyzer – optický spektrálny analyzér

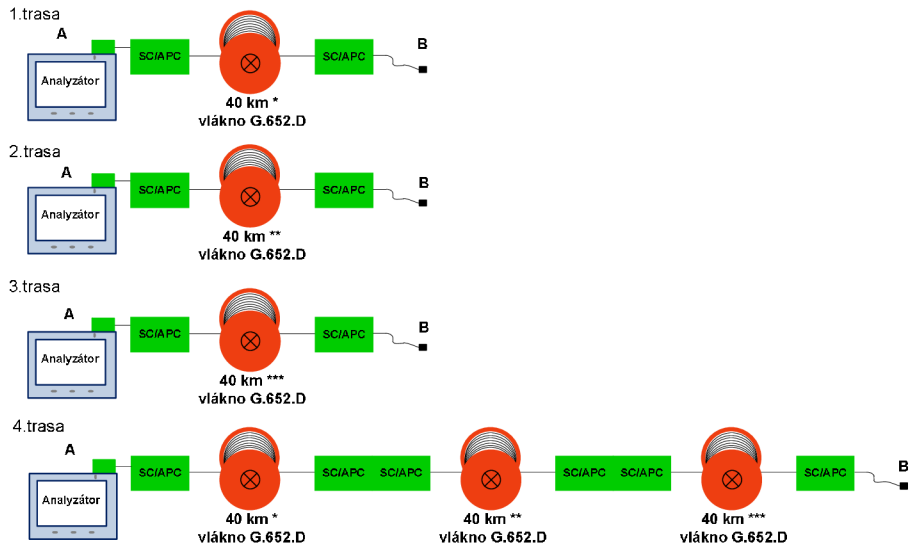
ORL	optical return loss – optický spätný útlm
PBS	polarization beam splitter – polarizačný delič
PC	polarization controler – polarizačný kontrolér
PC	point contact – fyzický kontakt
ps	picosecond – pikosekunda
ps/(nm.km)	picosecond per nanometre times kilometre – pikosekunda na nanometer a kilometer
ps/ $\sqrt{km}$	picosecond per square root kilometre – pikosekunda na druhú odmocninu kilometru
PMD	polarization mode dispersion – polarizačná vidová disperzia
PMF	polarization maintaining fiber – vlákno zachovávajúce polarizáciu
PSP	principal States of Polarization – principiálne stavy polarizácie
rad/m	radian per metre – radián za meter
RZ	return zero – návrat k nule
RMS	root mean square – stredná kvadratická
$SiO_2$	oxid kremičitý
s	second – sekunda
s/km	second per kilometre – sekunda za kilometer
SC	standard connector – štandardný konektor
SDH	synchronous digital hierarchy – synchrónna digitálna hierarchia
SNR	signal-to-noise ratio – odstup signál-šum
SMF	single mode fiber – jendovidové vlákno
SOP	state of polarization – stav polarizácie
STM	synchronous transport module – synchrónny transportný modul (prenosový štandard)
t	čas
$t_g$	zmena skupinového oneskorenia

$t_s$	skupinové oneskorenie
T	perióda
$T_0$	jednotkový interval
TIA	photodiode trans-impedance amplifier – fotodiódový trans-impedančný zosilňovač
TIA	telecommunication industry association – priemyselné telekomunikačné združenie
tzn.	to znamená
tzv.	takzvaný
TF	transversal filter – transversálny filter
THz	Tera Hertz
UV	ultraviolet – ultrafialový
USA	United States of America – Spojené Štáty Americké
USB	universal serial bus – univerzálna sériová zbernica
$v$	rýchlosť šírenia
$v_F$	fázová rýchlosť
$v_G, v_g$	grupová rýchlosť
$v_{sk}$	skupinová rýchlosť
WDM	wavelength division multiplex – vlnový multiplex
$V_D$	Abbeho číslo
$z$	súradnica miesta

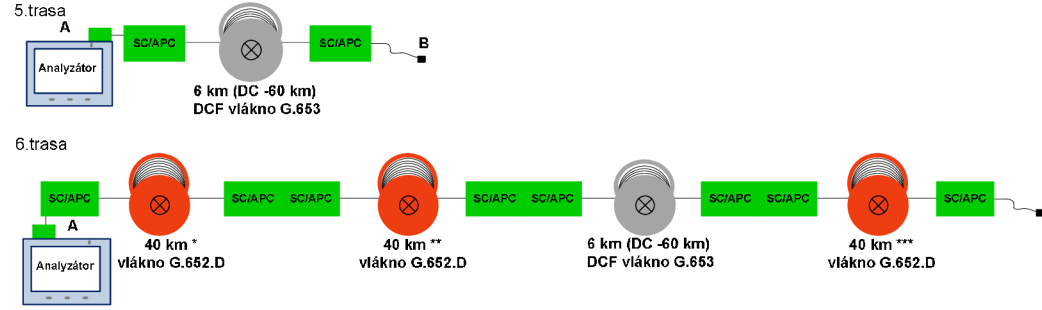
# ZOZNAM PRÍLOH

# Príloha Topológie

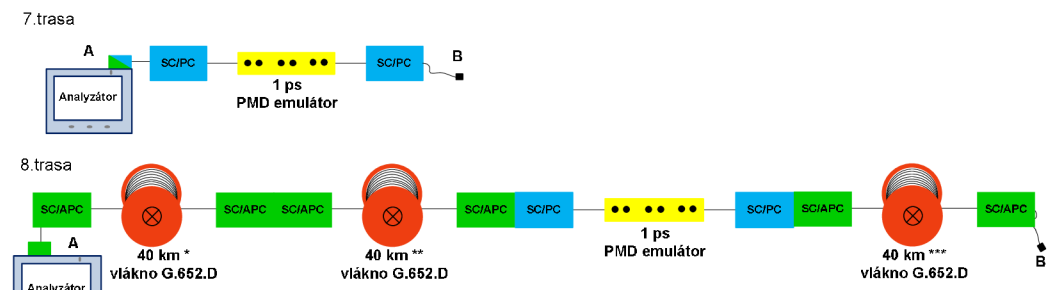
## I.test



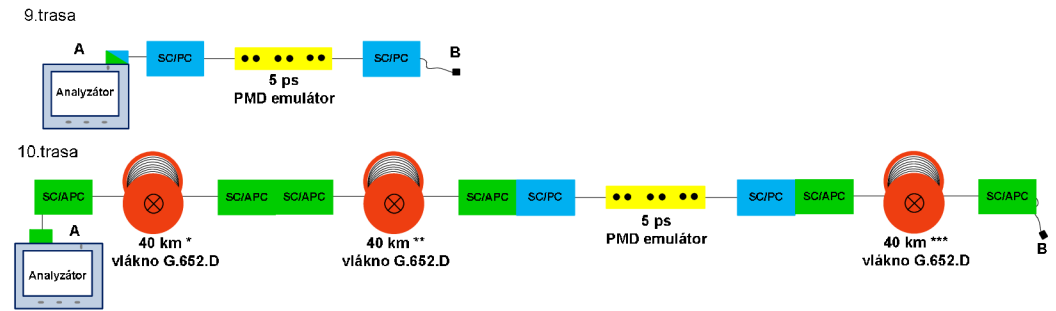
## II.test



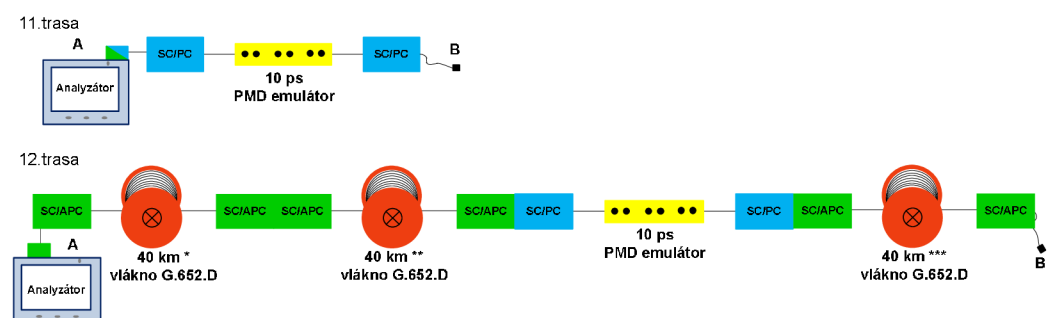
## III.test



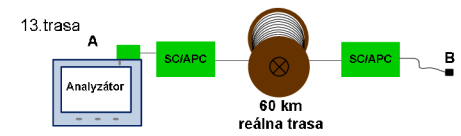
## IV.test



## V.test



## VI.test



Vysvetlivky:  
 SCI/APC - rovný konektor  
 SCI/PC - šikmý konektor  
 \* - prvé 40 km vlákno  
 \*\* - druhé 40 km vlákno  
 \*\*\* - tretie 40 km vlákno



## Príloha 1.1

Namerané hodnoty platforma MTS-8000

	PMD					
	Dĺžka trasy [km]	PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ km.nm]	
<b>I.test</b>	1.trasa	40	0,2890	0,0460	0,0380	1,00E-03
		40	0,2720	0,0430	0,0340	1,00E-03
		40	0,2970	0,0470	0,0400	1,00E-03
	2.trasa	40	0,3330	0,0530	0,0500	1,00E-03
		40	0,3190	0,0500	0,0460	1,00E-03
		40	0,3210	0,0510	0,0470	1,00E-03
	3.trasa	40	0,3760	0,0590	0,0640	2,00E-03
		40	0,3680	0,0580	0,0610	2,00E-03
		40	0,3740	0,0590	0,0630	2,00E-03
4.trasa	120	0,7550	0,1190	0,2580	6,00E-03	
	120	0,6720	0,1060	0,2050	5,00E-03	
	120	0,6800	0,1080	0,2090	5,00E-03	
<b>II.test</b>	5.trasa	6	0,0570	0,0230	0,0010	0,00E+00
		6	0,0680	0,0280	0,0020	0,00E+00
		6	0,0470	0,0190	0,0010	0,00E+00
	6.trasa	126	0,5920	0,0530	0,1590	1,00E-03
		126	0,6220	0,0550	0,1750	1,00E-03
		126	0,5380	0,0480	0,1310	1,00E-03
<b>III.test</b>	7.trasa	/	0,8560	0,0760	0,3320	3,00E-03
		/	0,8520	0,0760	0,3290	3,00E-03
		/	0,8480	0,0760	0,3260	3,00E-03
	8.trasa	120	1,1730	0,1070	0,6230	5,00E-03
		120	1,2230	0,1120	0,6780	6,00E-03
		120	/	/	/	/
<b>IV.test</b>	9.trasa	/	4,6610	0,4150	9,8410	7,80E-02
		/	4,6360	0,4130	9,7360	7,70E-02
		/	4,6300	0,4120	9,7110	7,70E-02
	10.trasa	120	4,6130	0,4210	9,6400	8,00E-02
		120	4,6040	0,4200	9,6020	8,00E-02
		120	4,6450	0,4240	9,7740	8,10E-02
<b>V.test</b>	11.trasa	/	10,4360	0,9300	49,3360	3,92E-01
		/	10,6890	0,9520	51,7570	4,11E-01
		/	/	/	/	/
	12.trasa	120	11,1840	1,0210	56,6620	4,72E-01
		120	10,6650	0,9740	51,5250	4,29E-01
		120	11,1540	1,0180	56,3590	4,70E-01
<b>VI.test</b>	13.trasa	58	0,6780	0,0890	0,2080	4,00E-03
		58	0,6840	0,0900	0,2120	4,00E-03
		58	0,7180	0,0940	0,2340	4,00E-03

Vypočítané hodnoty platforma MTS-8000

Trasa	Priemer PMD [ps]	Štandardná odchýlka [ps]	Variačný koeficient [%]	Rozptyl [ps]	Disperzia	PMD Max. [ps]	PMD Min. [ps]	Štandardná odchýlka prístroja [ps]	Štandardná odchýlka prístroja a PMD emulátora [ps]
1.	0,2860	0,0128	4,4640	1,09E-04	0,0874	0,2970	0,2720	0,0057	0,0057
2.	0,3243	0,0076	2,3346	3,82E-05	0,0432	0,3330	0,3190	0,0065	0,0065
3.	0,3727	0,0042	1,1172	1,16E-05	0,0215	0,3760	0,3680	0,0075	0,0075
4.	0,7023	0,0458	6,5191	1,40E-03	0,1182	0,7550	0,6720	0,0140	0,0140
5.	0,0573	0,0105	18,3209	7,36E-05	0,3663	0,0680	0,0470	0,0011	0,0011
6.	0,5840	0,0426	7,2890	1,21E-03	0,1438	0,6220	0,5380	0,0117	0,0117
7.	0,8520	0,0040	0,4695	1,07E-05	0,0094	0,8560	0,8480	0,0170	0,1113
8.	1,1980	0,0354	2,9512	6,25E-04	0,0417	1,2230	1,1730	0,0240	0,1126
9.	4,6423	0,0164	0,3542	1,80E-04	0,0067	4,6610	4,6300	0,0928	0,3815
10.	4,6207	0,0215	0,4663	3,10E-04	0,0089	4,6450	4,6040	0,0924	0,3814
11.	10,5625	0,1789	1,6937	1,60E-02	0,0240	10,6890	10,4360	0,2113	0,4881
12.	11,0010	0,2914	2,6486	5,66E-02	0,0472	11,1840	10,6650	0,2200	0,4919
13.	0,6933	0,0216	3,1113	3,10E-04	0,0577	0,7180	0,6780	0,0139	0,0139

## Príloha 2.1

Namerané hodnoty platforma EXFO FTB-5500B

	PMD					
	Dĺžka trasy [km]	PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ km.nm]	
<b>I.test</b>	1.trasa	40	0,4818	0,0762	0,1016	0,0025
		40	0,4665	0,0738	0,0941	0,0024
		40	0,4635	0,0733	0,0929	0,0023
	2.trasa	40	0,2494	0,0394	0,0269	0,0007
		40	0,2518	0,0398	0,0274	0,0007
		40	0,2516	0,0398	0,0274	0,0007
	3.trasa	40	0,4235	0,0670	0,0787	0,0020
		40	0,4239	0,0670	0,0788	0,0020
		40	0,4238	0,0670	0,0788	0,0020
4.trasa	120	0,4012	0,0366	0,0706	0,0006	
	120	0,4098	0,0374	0,0737	0,0006	
	120	0,3889	0,0355	0,0664	0,0006	
<b>II.test</b>	5.trasa	6	0,1220	0,0498	0,0064	0,0011
		6	0,1187	0,0485	0,0061	0,0010
		6	0,1164	0,0475	0,0058	0,0010
	6.trasa	126	0,6561	0,0585	0,1903	0,0015
		126	0,6174	0,0550	0,1685	0,0013
		126	0,4846	0,0432	0,1010	0,0008
<b>III.test</b>	7.trasa	0,01	0,9378	9,3781	0,3821	38,2141
		0,01	0,9530	9,5303	0,3946	39,4640
		0,01	0,9551	9,5514	0,3964	39,6392
	8.trasa	120	1,1135	0,1016	0,5401	0,0045
		120	1,1011	0,1005	0,5361	0,0045
		120	1,0816	0,0987	0,5172	0,0043
<b>IV.test</b>	9.trasa	0,01	4,8782	48,7818	10,4948	1049,4782
		0,01	4,9024	49,0238	10,5991	1059,9146
		0,01	4,9021	49,0214	10,5981	1059,8098
	10.trasa	120	5,2922	0,4831	12,3516	0,1029
		120	5,2731	0,4814	12,2630	0,1022
		120	5,2688	0,4810	12,2427	0,1020
<b>V.test</b>	11.trasa	0,01	11,1894	111,8935	54,1296	5412,9608
		0,01	11,2065	112,0648	54,2955	5429,5461
		0,01	11,2222	112,2224	54,4483	5444,8333
	12.trasa	120	10,6895	0,9758	50,2685	0,4189
		120	10,7517	0,9815	50,8553	0,4238
		120	10,7737	0,9835	51,0638	0,4255
<b>VI.test</b>	13.trasa	57	0,6231	0,0825	0,1678	0,0029
		57	0,6202	0,0822	0,1663	0,0029
		57	0,6202	0,0821	0,1663	0,0029

Vypočítané hodnoty platforma EXFO FTB-5500B

Trasa	Priemer PMD [ps]	Štandardná odchýlka [ps]	Variačný koeficient [%]	Rozptyl [ps]	Disperzia	PMD Max. [ps]	PMD Min [ps]	Štandardná odchýlka prístroja [ps]	Štandardná odchýlka prístroja a PMD emulátora [ps]
1.	0,4706	0,0098	2,0856	6,42E-05	0,0389	0,4818	0,4635	0,0294	0,0294
2.	0,2509	0,0013	0,5307	1,18E-06	0,0096	0,2518	0,2494	0,0250	0,0250
3.	0,4237	0,0002	0,0491	2,89E-08	0,0009	0,4239	0,4235	0,0285	0,0285
4.	0,4000	0,0105	2,6263	7,36E-05	0,0523	0,4098	0,3889	0,0280	0,0280
5.	0,1190	0,0028	2,3648	5,28E-06	0,0470	0,1220	0,1164	0,0224	0,0224
6.	0,5860	0,0899	15,3489	5,39E-03	0,2926	0,6561	0,4846	0,0317	0,0317
7.	0,9486	0,0094	0,9952	5,94E-05	0,0182	0,9551	0,9378	0,0390	0,1167
8.	1,0987	0,0161	1,4636	1,72E-04	0,0290	1,1135	1,0816	0,0420	0,1177
9.	4,8942	0,0139	0,2837	1,29E-04	0,0049	4,9024	4,8782	0,1179	0,3883
10.	5,2780	0,0125	0,2360	1,03E-04	0,0044	5,2922	5,2688	0,1256	0,3907
11.	11,2060	0,0164	0,1464	1,79E-04	0,0029	11,2222	11,1894	0,2441	0,5032
12.	10,7383	0,0437	0,4067	1,27E-03	0,0078	10,7737	10,6895	0,2348	0,4987
13.	0,6212	0,0017	0,2695	1,87E-06	0,0047	0,6231	0,6202	0,0324	0,0324

## Príloha 3.1

Namerané hodnoty platforma EXFO FTB-5700

	PMD				
	Dĺžka trasy [km]	PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	
I.test	1.trasa	40,005	0,36	0,0574	0,0589
		40,005	0,34	0,0542	0,0532
		40,005	0,33	0,0523	0,0497
	2.trasa	40,075	0,29	0,0453	0,0373
		40,075	0,26	0,0406	0,0300
		40,075	0,25	0,0389	0,0275
	3.trasa	40,032	0,25	0,0398	0,0287
		40,032	0,30	0,0466	0,0395
		40,032	0,26	0,0414	0,0312
4.trasa	120,101	0,52	0,0474	0,1222	
	120,101	0,49	0,0451	0,1108	
	120,101	0,48	0,0436	0,1035	
II.test	5.trasa	6,187	0,09	0,0372	0,0039
		6,188	0,08	0,0328	0,0030
		6,188	0,08	0,0317	0,0028
	6.trasa	126,286	0,44	0,0388	0,0863
		126,286	0,40	0,0355	0,0721
		126,286	0,42	0,0371	0,0785
III.test	7.trasa	1,01	0,87	0,8632	0,3413
		1,01	0,88	0,8748	0,3505
		1,01	0,91	0,9056	0,3755
	8.trasa	120,106	1,09	0,0991	0,5358
		120,106	1,22	0,1117	0,6829
		120,106	0,96	0,0872	0,4147
IV.test	9.trasa	1,018	4,70	4,6569	10,0162
		1,018	5,32	5,2767	12,8596
		1,019	5,17	5,1188	12,1055
	10.trasa	120,115	5,29	0,4824	12,7727
		120,115	5,42	0,4944	13,4163
		120,115	5,34	0,4877	13,0484
V.test	11.trasa	1,03	10,59	10,4355	50,8764
		1,03	9,82	9,6773	43,7522
		1,03	10,88	10,7181	53,6531
	12.trassa	120,127	10,98	1,0021	55,1011
		120,127	11,28	1,0288	58,1090
		120,127	10,44	0,9522	49,7524
VI.test	13.trasa	56,853	0,78	0,1037	0,2772
		56,852	0,80	0,1059	0,2891
		56,853	0,88	0,1164	0,3497

Vypočítané hodnoty platforma EXFO FTB-5700

Trasa	Priemer PMD [ps]	Štandardná odchýlka [ps]	Variačný koeficient [%]	Rozptyl [ps]	Disperzia	PMD Max. [ps]	PMD Min. [ps]	Štandardná odchýlka prístroja [ps]	Štandardná odchýlka prístroja a PMD emulátora [ps]
1.	0,3433	0,0153	4,4491	1,56E-04	0,0874	0,3600	0,3300	0,2172	0,2172
2.	0,2667	0,0208	7,8062	2,89E-04	0,1500	0,2900	0,2500	0,2133	0,2133
3.	0,2700	0,0265	9,7991	4,67E-04	0,1852	0,3000	0,2500	0,2135	0,2135
4.	0,4967	0,0208	4,1913	2,89E-04	0,0805	0,5200	0,4800	0,2248	0,2248
5.	0,0833	0,0058	6,9282	2,22E-05	0,1200	0,0900	0,0800	0,2042	0,2042
6.	0,4200	0,0200	4,7619	2,67E-04	0,0952	0,4400	0,4000	0,2210	0,2210
7.	0,8867	0,0208	2,3477	2,89E-04	0,0451	0,9100	0,8700	0,2443	0,2680
8.	1,0900	0,1300	11,9266	1,13E-02	0,2385	1,2200	0,9600	0,2545	0,2773
9.	5,0633	0,3235	6,3885	6,98E-02	0,1224	5,3200	4,7000	0,4532	0,5850
10.	5,3500	0,0656	1,2257	2,87E-03	0,0243	5,4200	5,2900	0,4675	0,5962
11.	10,4300	0,5478	5,2523	2,00E-01	0,1016	10,8800	9,8200	0,7215	0,8451
12.	10,9000	0,4257	3,9053	1,21E-01	0,0771	11,2800	10,4400	0,7450	0,8652
13.	0,8200	0,0529	6,4531	1,87E-03	0,1220	0,8800	0,7800	0,2410	0,2410

## Príloha 4

Namerané hodnoty pre konektor SC-PC

PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ nm*km]	Čas	Teplota [°C]
0,3225	0,2269	0,0453	0,0224	15:00	15,8
0,3178	0,2236	0,0440	0,0218	15:15	12,9
0,3597	0,2531	0,0562	0,0278	15:30	8,7
0,3386	0,2383	0,0498	0,0247	15:45	5,6
0,3436	0,2418	0,0513	0,0254	16:00	2,0
0,3865	0,2720	0,0648	0,0321	16:15	-0,4
0,3288	0,2313	0,0469	0,0232	16:30	-4,7
0,4354	0,3063	0,0820	0,0406	16:45	-7,5
0,3016	0,2122	0,0395	0,0196	17:01	-11,7
0,2902	0,2042	0,0366	0,0181	17:16	-14,3
0,2830	0,1991	0,0348	0,0172	17:31	-18,5
0,2831	0,1992	0,0348	0,0172	17:46	-20,0
0,2853	0,2007	0,0354	0,0175	18:01	-17,4
0,2841	0,1999	0,0351	0,0174	18:16	-13,8
0,2349	0,1653	0,0240	0,0119	18:31	-10,2
0,2788	0,1962	0,0338	0,0167	18:46	-6,4
0,2590	0,1823	0,0292	0,0144	19:01	-3,2
0,2834	0,1994	0,0350	0,0173	19:16	0,5
0,2471	0,1739	0,0266	0,0132	19:31	4,6
0,1211	0,0852	0,0064	0,0032	19:46	7,2
0,2839	0,1998	0,0352	0,0174	20:01	10,0
0,3449	0,2427	0,0518	0,0256	20:17	13,6
0,4168	0,2932	0,0753	0,0373	20:32	18,2
0,3249	0,2286	0,0464	0,0230	20:47	22,8
0,3156	0,2220	0,0437	0,0216	21:02	25,7
0,3196	0,2249	0,0448	0,0222	21:17	27,7
0,3525	0,2480	0,0539	0,0267	21:32	30,5
0,3537	0,2489	0,0544	0,0269	21:47	33,8
0,3388	0,2384	0,0499	0,0247	22:02	38,0
0,3613	0,2542	0,0569	0,0281	22:17	43,4
0,3521	0,2477	0,0540	0,0267	22:32	47,6
0,3411	0,2400	0,0506	0,0250	22:47	51,0
0,3481	0,2449	0,0528	0,0261	23:03	53,1
0,3331	0,2343	0,0482	0,0239	23:18	55,1
0,3168	0,2229	0,0436	0,0216	23:33	59,3
0,3440	0,2420	0,0514	0,0254	23:48	64,9
0,2714	0,1909	0,0326	0,0161	0:03	69,3
0,3160	0,2224	0,0429	0,0212	0:18	70,2
0,3646	0,2566	0,0571	0,0282	0:33	69,7
0,3805	0,2677	0,0621	0,0308	0:49	69,1
0,3581	0,2520	0,0550	0,0272	1:04	70,0
0,3663	0,2577	0,0576	0,0285	1:19	72,0
0,3739	0,2631	0,0601	0,0298	1:34	74,2
0,4100	0,2884	0,0723	0,0358	1:49	75,4
0,3730	0,2624	0,0598	0,0296	2:04	76,2
0,3877	0,2728	0,0647	0,0320	2:19	76,6
0,3763	0,2648	0,0611	0,0302	2:34	76,7

## Príloha 5

Namerané hodnoty pre konektor FC-PC

PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ nm* km]	Čas	Teplota [°C]
0,3068	0,2158	0,0405	0,0200	9:13	15,4
0,2709	0,1905	0,0317	0,0157	9:28	12,2
0,2323	0,1633	0,0233	0,0115	9:43	8,1
0,2555	0,1797	0,0281	0,0139	9:58	4,3
0,3848	0,2706	0,0640	0,0317	10:13	1,3
0,3988	0,2804	0,0687	0,0340	10:28	-2,1
0,4009	0,2819	0,0697	0,0344	10:43	-5,6
0,4065	0,2859	0,0714	0,0353	10:58	-9,3
0,3431	0,2413	0,0509	0,0252	11:13	-12,5
0,2942	0,2069	0,0373	0,0185	11:28	-16,0
0,3736	0,2627	0,0603	0,0298	11:43	-19,5
0,2995	0,2106	0,0388	0,0192	11:58	-20,6
0,3410	0,2398	0,0503	0,0249	12:13	-17,1
0,4030	0,2834	0,0704	0,0348	12:28	-13,5
0,3796	0,2669	0,0623	0,0308	12:43	-9,5
0,4061	0,2856	0,0713	0,0353	12:59	-5,8
0,4152	0,2920	0,0747	0,0370	13:14	-1,9
0,3960	0,2785	0,0678	0,0335	13:29	0,8
0,4127	0,2902	0,0736	0,0364	13:44	4,4
0,4174	0,2935	0,0753	0,0372	13:59	8,4
0,2860	0,2011	0,0353	0,0174	14:14	12,4
0,2960	0,2082	0,0378	0,0187	14:29	14,7
0,2707	0,1904	0,0316	0,0156	14:44	17,2
0,2549	0,1793	0,0280	0,0139	14:59	21,4
0,3724	0,2619	0,0601	0,0297	15:14	26,2
0,4701	0,3306	0,0955	0,0472	15:30	29,2
0,3465	0,2437	0,0519	0,0257	15:45	32,1
0,3510	0,2469	0,0533	0,0263	16:00	34,7
0,2167	0,1524	0,0203	0,0100	16:15	39,3
0,1398	0,0983	0,0085	0,0042	16:30	44,3
0,1708	0,1201	0,0127	0,0063	16:45	48,3
0,3230	0,2271	0,0455	0,0225	17:00	50,9
0,3560	0,2503	0,0553	0,0274	17:15	53,1
0,3360	0,2363	0,0491	0,0243	17:30	56,2
0,4236	0,2979	0,0780	0,0386	17:46	62,5
0,2394	0,1684	0,0248	0,0123	18:01	66,2
0,2341	0,1647	0,0237	0,0117	18:16	68,2
0,3417	0,2403	0,0505	0,0250	18:31	68,1
0,3273	0,2302	0,0462	0,0228	18:46	68,8
0,2936	0,2065	0,0371	0,0183	19:01	70,6
0,2960	0,2082	0,0380	0,0188	19:16	72,8
0,2986	0,2100	0,0388	0,0192	19:32	73,8
0,2939	0,2067	0,0375	0,0186	19:47	73,7
0,2812	0,1977	0,0343	0,0169	20:02	73,1
0,2736	0,1924	0,0325	0,0160	20:17	72,9
0,2655	0,1867	0,0306	0,0151	20:32	73,8
0,2622	0,1844	0,0298	0,0147	20:47	75,9



## Príloha 6

Namerané hodnoty pre konektor SC-APC

PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ nm*km]	Čas	Teplota [°C]
0,4054	0,2851	0,0712	0,0352	8:24	15,7
0,4247	0,2987	0,0780	0,0386	8:39	13,2
0,3477	0,2445	0,0525	0,0260	8:54	8,7
0,3482	0,2449	0,0527	0,0261	9:09	5,0
0,3512	0,2470	0,0535	0,0264	9:25	1,8
0,3566	0,2508	0,0551	0,0273	9:40	-1,5
0,3555	0,2500	0,0548	0,0271	9:55	-5,1
0,3459	0,2432	0,0520	0,0257	10:10	-8,7
0,3891	0,2736	0,0658	0,0325	10:25	-12,0
0,3268	0,2298	0,0465	0,0230	10:40	-14,7
0,4071	0,2863	0,0718	0,0355	10:55	-18,3
0,4938	0,3473	0,1052	0,0520	11:10	-20,2
0,4732	0,3328	0,0966	0,0478	11:25	-17,6
0,4241	0,2983	0,0778	0,0385	11:40	-14,2
0,2530	0,1779	0,0277	0,0137	11:55	-10,2
0,2395	0,1684	0,0249	0,0123	12:10	-6,8
0,3111	0,2188	0,0419	0,0207	12:25	-3,3
0,3368	0,2368	0,0492	0,0243	12:40	1,1
0,2827	0,1988	0,0347	0,0172	12:56	3,3
0,3170	0,2229	0,0437	0,0216	13:11	6,5
0,4315	0,3034	0,0805	0,0398	13:26	10,6
0,4630	0,3256	0,0927	0,0458	13:41	15,3
0,2933	0,2063	0,0374	0,0185	13:56	19,9
0,3491	0,2455	0,0528	0,0261	14:11	22,6
0,2893	0,2034	0,0364	0,0180	14:26	24,2
0,2661	0,1871	0,0308	0,0152	14:41	27,3
0,2590	0,1821	0,0291	0,0144	14:56	30,4
0,2674	0,1881	0,0311	0,0154	15:12	34,1
0,2451	0,1724	0,0262	0,0129	15:27	38,0
0,3025	0,2128	0,0397	0,0196	15:42	43,1
0,3226	0,2269	0,0451	0,0223	15:57	47,5
0,3605	0,2535	0,0563	0,0279	16:12	51,9
0,3452	0,2428	0,0518	0,0256	16:27	55,6
0,3295	0,2317	0,0472	0,0233	16:42	59,4
0,3090	0,2173	0,0415	0,0205	16:57	62,9
0,3254	0,2288	0,0461	0,0228	17:13	66,1
0,3475	0,2444	0,0525	0,0259	17:28	69,1
0,4091	0,2877	0,0727	0,0360	17:43	69,9
0,4295	0,3020	0,0801	0,0396	17:58	70,0
0,4322	0,3040	0,0812	0,0401	18:13	70,1
0,4333	0,3047	0,0818	0,0405	18:28	70,4
0,4187	0,2944	0,0762	0,0377	18:43	70,7
0,3843	0,2703	0,0643	0,0318	18:59	71,3
0,4243	0,2984	0,0782	0,0387	19:14	72,3
0,3553	0,2499	0,0558	0,0276	19:29	73,7
0,3577	0,2515	0,0566	0,0280	19:44	75,6
0,3684	0,2591	0,0600	0,0297	19:59	77,1

## Príloha 7

Namerané hodnoty pre konektor FC-APC

PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD value, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ nm* km]	Čas	Teplota [°C]
0,4555	0,3203	0,0892	0,0441	8:21	15,8
0,4877	0,3430	0,1026	0,0507	8:36	12,9
0,4188	0,2945	0,0757	0,0374	8:52	8,4
0,4019	0,2826	0,0697	0,0345	9:07	4,7
0,4095	0,2880	0,0723	0,0358	9:22	1,7
0,4164	0,2929	0,0746	0,0369	9:37	-1,3
0,4036	0,2838	0,0701	0,0347	9:52	-5,9
0,3938	0,2769	0,0667	0,0330	10:07	-8,6
0,4265	0,2999	0,0782	0,0387	10:22	-11,9
0,3988	0,2805	0,0684	0,0338	10:37	-15,0
0,4348	0,3057	0,0813	0,0402	10:52	-18,6
0,4366	0,3070	0,0820	0,0406	11:07	-20,3
0,4288	0,3016	0,0791	0,0391	11:22	-17,5
0,4249	0,2988	0,0777	0,0384	11:37	-14,0
0,4207	0,2959	0,0762	0,0377	11:52	-10,1
0,4259	0,2995	0,0780	0,0386	12:07	-6,7
0,4327	0,3043	0,0805	0,0398	12:22	-3,3
0,4607	0,3240	0,0913	0,0452	12:38	1,8
0,4362	0,3068	0,0819	0,0405	12:53	4,5
0,4313	0,3033	0,0800	0,0396	13:08	6,8
0,4114	0,2894	0,0728	0,0360	13:23	10,3
0,4102	0,2885	0,0724	0,0358	13:38	14,4
0,4176	0,2936	0,0750	0,0371	13:53	19,3
0,4441	0,3123	0,0850	0,0421	14:08	23,5
0,4443	0,3125	0,0851	0,0421	14:23	26,5
0,4284	0,3012	0,0791	0,0391	14:38	28,9
0,4312	0,3033	0,0802	0,0397	14:53	32,2
0,4120	0,2897	0,0730	0,0361	15:09	34,1
0,4161	0,2926	0,0745	0,0368	15:24	37,3
0,3940	0,2771	0,0668	0,0330	15:39	41,1
0,3950	0,2778	0,0671	0,0332	15:54	45,2
0,3702	0,2604	0,0590	0,0292	16:09	49,9
0,3860	0,2714	0,0641	0,0317	16:24	54,2
0,3724	0,2619	0,0597	0,0295	16:39	58,7
0,4014	0,2823	0,0693	0,0343	16:54	62,6
0,3920	0,2757	0,0661	0,0327	17:09	66,3
0,4665	0,3280	0,0938	0,0464	17:25	69,4
0,4046	0,2846	0,0704	0,0348	17:40	70,2
0,4248	0,2988	0,0778	0,0385	17:55	70,1
0,4052	0,2850	0,0706	0,0349	18:10	70,4
0,3827	0,2691	0,0630	0,0312	18:25	70,4
0,4036	0,2839	0,0703	0,0347	18:40	70,7
0,3979	0,2798	0,0683	0,0338	18:55	71,2
0,4022	0,2829	0,0698	0,0345	19:11	72,7
0,3948	0,2777	0,0671	0,0332	19:26	74,4
0,3844	0,2703	0,0636	0,0314	19:41	76,0
0,4025	0,2830	0,0699	0,0345	19:56	77,2

## Príloha 8

Namerané hodnoty pre konektor E 2000-APC

PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ nm* km]	Čas	Teplota [°C]
0,5384	0,3788	0,1272	0,0630	8:03	15,5
0,4406	0,3100	0,0848	0,0420	8:18	12,8
0,4279	0,3011	0,0799	0,0396	8:33	8,6
0,4277	0,3010	0,0797	0,0395	8:48	4,9
0,3888	0,2735	0,0670	0,0332	9:03	1,8
0,3492	0,2457	0,0539	0,0267	9:18	-1,2
0,4264	0,3000	0,0806	0,0399	9:33	-5,0
0,4039	0,2842	0,0723	0,0358	9:48	-8,6
0,4197	0,2953	0,0764	0,0378	10:03	-11,7
0,3836	0,2699	0,0652	0,0323	10:18	-15,0
0,3900	0,2744	0,0674	0,0334	10:33	-18,6
0,3883	0,2732	0,0668	0,0331	10:48	-20,5
0,3983	0,2803	0,0705	0,0349	11:03	-17,6
0,3792	0,2668	0,0637	0,0315	11:18	-14,6
0,3333	0,2345	0,0490	0,0243	11:33	-10,5
0,3435	0,2417	0,0520	0,0258	11:49	-6,6
0,3746	0,2635	0,0620	0,0307	12:04	-3,4
0,4229	0,2976	0,0793	0,0392	12:19	0,4
0,4340	0,3054	0,0818	0,0405	12:34	4,8
0,4269	0,3004	0,0792	0,0392	12:49	7,8
0,4261	0,2998	0,0791	0,0392	13:04	10,1
0,3507	0,2467	0,0545	0,0270	13:19	13,3
0,3837	0,2700	0,0641	0,0317	13:34	17,2
0,4780	0,3363	0,0993	0,0491	13:49	22,2
0,3953	0,2782	0,0682	0,0338	14:04	26,4
0,5384	0,3788	0,1259	0,0623	14:20	28,5
0,2925	0,2058	0,0374	0,0185	14:35	31,4
0,3638	0,2560	0,0577	0,0285	14:50	34,0
0,3088	0,2173	0,0416	0,0206	15:05	37,3
0,3232	0,2274	0,0456	0,0226	15:20	41,1
0,3386	0,2382	0,0501	0,0248	15:35	45,2
0,3779	0,2659	0,0620	0,0307	15:50	50,3
0,3597	0,2531	0,0571	0,0282	16:05	54,6
0,3505	0,2466	0,0532	0,0264	16:21	59,3
0,3155	0,2220	0,0438	0,0217	16:36	62,8
0,2516	0,1770	0,0277	0,0137	16:51	65,8
0,2598	0,1828	0,0290	0,0143	17:06	68,6
0,3359	0,2363	0,0485	0,0240	17:21	69,1
0,2902	0,2042	0,0361	0,0179	17:36	69,3
0,3211	0,2259	0,0442	0,0219	17:51	69,7
0,3566	0,2509	0,0560	0,0277	18:07	70,8
0,3648	0,2567	0,0585	0,0290	18:22	70,8
0,3611	0,2541	0,0574	0,0284	18:37	71,9
0,3689	0,2596	0,0599	0,0296	18:52	73,6
0,3471	0,2442	0,0530	0,0262	19:07	75,5
0,3723	0,2619	0,0610	0,0302	19:22	76,6
0,3655	0,2571	0,0588	0,0291	19:37	77,6

## Príloha 9

Namerané hodnoty pre vlákno G.652.D

PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm* km]	Čas	Teplota [°C]
0,0276	0,0391	0,0003	0,0007	8:38	15,4
0,0527	0,0745	0,0012	0,0025	8:53	12,6
0,0808	0,1142	0,0029	0,0058	9:08	8,4
0,0482	0,0682	0,0010	0,0021	9:23	4,3
0,0174	0,0246	0,0001	0,0003	9:38	0,1
0,0882	0,1247	0,0035	0,0069	9:53	-4,3
0,0268	0,0379	0,0003	0,0006	10:08	-8,6
0,0201	0,0285	0,0002	0,0004	10:23	-13,3
-0,0091	-0,0129	0,0000	0,0001	10:38	-17,5
0,0222	0,0314	0,0002	0,0004	10:53	-21,9
0,0240	0,0339	0,0003	0,0005	11:08	-25,9
0,0829	0,1172	0,0031	0,0061	11:23	-28,2
0,0498	0,0705	0,0011	0,0022	11:38	-24,1
0,0348	0,0492	0,0005	0,0011	11:54	-19,4
0,0387	0,0547	0,0007	0,0013	12:09	-13,9
0,0789	0,1115	0,0028	0,0056	12:24	-9,1
0,0164	0,0231	0,0001	0,0002	12:39	-5,3
0,0173	0,0244	0,0001	0,0003	12:54	-0,8
0,0814	0,1151	0,0030	0,0059	13:09	4,1
0,0148	0,0210	0,0001	0,0002	13:24	9,3
0,0289	0,0409	0,0004	0,0007	13:39	12,7
0,0688	0,0973	0,0021	0,0042	13:54	15,3
0,0727	0,1028	0,0024	0,0047	14:09	17,7
0,0520	0,0736	0,0012	0,0024	14:24	20,2
0,0553	0,0783	0,0014	0,0027	14:40	23,7
0,0218	0,0309	0,0002	0,0004	14:55	28,9
0,0254	0,0359	0,0003	0,0006	15:10	33,6
0,0152	0,0216	0,0001	0,0002	15:25	35,1
0,0100	0,0142	0,0000	0,0001	15:40	41,5
0,0280	0,0396	0,0004	0,0007	15:55	44,2
0,0520	0,0735	0,0012	0,0024	16:10	47,9
0,0777	0,1099	0,0027	0,0054	16:25	49,0
0,0362	0,0512	0,0006	0,0012	16:41	52,1
0,0430	0,0608	0,0008	0,0016	16:56	56,2
0,0515	0,0729	0,0012	0,0024	17:11	60,9
0,0723	0,1022	0,0023	0,0047	17:26	65,6
0,0265	0,0375	0,0003	0,0006	17:41	70,2
0,0722	0,1021	0,0023	0,0047	17:56	71,3
0,0749	0,1060	0,0025	0,0050	18:11	72,0
0,0694	0,0982	0,0021	0,0043	18:26	72,0
0,0365	0,0517	0,0006	0,0012	18:42	71,3
0,0404	0,0572	0,0007	0,0015	18:57	71,1
0,0528	0,0747	0,0012	0,0025	19:12	71,2
0,0852	0,1206	0,0032	0,0065	19:27	71,4
0,0318	0,0449	0,0005	0,0009	19:42	72,0
0,0639	0,0904	0,0018	0,0036	19:57	73,0
0,0710	0,1004	0,0022	0,0045	20:12	74,3

## Príloha 10

Namerané hodnoty pre vlákno G.657

PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ nm* km]	Čas	Teplota [°C]
0,0178	0,0125	0,0001	0,0001	8:35	15,7
0,0666	0,0466	0,0020	0,0010	8:50	13,2
0,0224	0,0156	0,0002	0,0001	9:05	8,5
0,0513	0,0359	0,0012	0,0006	9:20	4,7
0,0309	0,0216	0,0004	0,0002	9:35	0,4
0,0211	0,0148	0,0002	0,0001	9:50	-4,5
0,0439	0,0308	0,0009	0,0004	10:05	-8,8
0,0175	0,0122	0,0001	0,0001	10:20	-13,8
0,0116	0,0082	0,0001	0,0000	10:35	-17,8
0,0122	0,0086	0,0001	0,0000	10:50	-22,0
0,0144	0,0101	0,0001	0,0000	11:05	-26,0
0,0123	0,0086	0,0001	0,0000	11:20	-28,2
0,0556	0,0389	0,0014	0,0007	11:36	-24,1
0,0457	0,0320	0,0010	0,0005	11:51	-19,6
0,0503	0,0352	0,0012	0,0006	12:06	-13,9
0,0189	0,0132	0,0002	0,0001	12:21	-9,2
0,0235	0,0165	0,0003	0,0001	12:36	-5,1
0,1092	0,0764	0,0054	0,0027	12:51	0,3
0,0367	0,0257	0,0006	0,0003	13:06	4,9
0,0966	0,0677	0,0042	0,0021	13:21	7,1
0,0239	0,0167	0,0003	0,0001	13:36	10,2
-0,0069	-0,0048	0,0000	0,0000	13:51	13,8
0,0861	0,0603	0,0033	0,0016	14:06	18,5
0,0174	0,0122	0,0001	0,0001	14:21	23,0
0,0155	0,0109	0,0001	0,0001	14:37	26,3
0,0082	0,0058	0,0000	0,0000	14:52	28,1
0,0342	0,0240	0,0005	0,0003	15:07	30,9
0,0097	0,0068	0,0000	0,0000	15:22	34,2
0,0119	0,0083	0,0001	0,0000	15:37	38,3
0,0348	0,0244	0,0005	0,0003	15:52	43,3
0,0114	0,0080	0,0001	0,0000	16:07	47,9
0,0167	0,0117	0,0001	0,0001	16:22	52,1
0,0197	0,0138	0,0002	0,0001	16:37	55,6
0,0171	0,0119	0,0001	0,0001	16:53	58,7
0,0219	0,0153	0,0002	0,0001	17:08	61,7
0,0309	0,0216	0,0004	0,0002	17:23	64,3
0,0377	0,0264	0,0006	0,0003	17:38	66,8
0,0445	0,0312	0,0009	0,0004	17:53	68,2
0,0653	0,0457	0,0018	0,0009	18:08	69,5
0,0918	0,0643	0,0036	0,0018	18:23	71,3
0,1015	0,0710	0,0045	0,0022	18:38	72,6
0,1309	0,0916	0,0074	0,0036	18:54	73,9
0,1362	0,0954	0,0080	0,0039	19:09	74,2
0,1197	0,0838	0,0062	0,0030	19:24	74,3
0,0951	0,0666	0,0039	0,0019	19:39	74,1
0,0849	0,0595	0,0031	0,0015	19:54	73,7
0,0808	0,0566	0,0028	0,0014	20:09	73,7

## Príloha 11

Namerané hodnoty pre zvary na vlákne

PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ nm* km]	Čas	Teplota [°C]
0,2556	0,1803	0,0290	0,0144	9:06	16,4
0,3155	0,2225	0,0441	0,0219	9:21	13,2
0,5773	0,4072	0,1441	0,0717	9:36	8,9
0,3191	0,2251	0,0437	0,0217	9:51	5,6
0,3620	0,2553	0,0574	0,0285	10:06	2,1
0,3662	0,2583	0,0584	0,0291	10:21	-0,6
0,3974	0,2803	0,0685	0,0341	10:36	-4,7
0,4653	0,3282	0,0934	0,0465	10:51	-7,8
0,4760	0,3357	0,0975	0,0485	11:06	-11,7
0,4220	0,2976	0,0781	0,0389	11:21	-14,2
0,3904	0,2754	0,0667	0,0332	11:36	-18,4
0,3903	0,2753	0,0667	0,0332	11:51	-20,3
0,4077	0,2876	0,0726	0,0361	12:07	-17,4
0,4311	0,3041	0,0810	0,0403	12:22	-13,8
0,3865	0,2726	0,0654	0,0325	12:37	-10,2
0,3599	0,2539	0,0560	0,0279	12:52	-6,5
0,4351	0,3069	0,0822	0,0409	13:07	-3,1
0,3769	0,2659	0,0608	0,0303	13:22	0,6
0,5569	0,3928	0,1334	0,0664	13:37	4,0
0,5730	0,4041	0,1416	0,0704	13:52	7,1
0,5606	0,3954	0,1353	0,0673	14:07	10,1
0,5209	0,3674	0,1170	0,0582	14:22	14,8
0,3970	0,2800	0,0681	0,0339	14:37	19,7
0,4913	0,3465	0,1038	0,0517	14:53	21,5
0,4098	0,2891	0,0726	0,0361	15:08	23,8
0,5744	0,4051	0,1423	0,0708	15:23	26,8
0,2491	0,1757	0,0269	0,0134	15:38	30,6
0,4005	0,2825	0,0693	0,0345	15:53	35,2
0,1833	0,1293	0,0146	0,0072	16:08	39,8
0,1732	0,1221	0,0132	0,0066	16:23	44,4
0,3051	0,2152	0,0403	0,0201	16:38	48,3
0,5545	0,3911	0,1326	0,0660	16:54	52,2
0,2945	0,2077	0,0376	0,0187	17:09	55,0
0,5144	0,3628	0,1141	0,5680	17:24	56,9
0,5085	0,3587	0,1115	0,0555	17:39	59,7
0,2402	0,1694	0,0254	0,0127	17:54	62,8
0,2814	0,1985	0,0349	0,0174	18:09	66,2
0,3172	0,2238	0,0436	0,0217	18:24	68,7
0,4492	0,3169	0,0868	0,0432	18:39	69,1
0,4716	0,3326	0,0974	0,0484	18:55	72,7
0,4067	0,2869	0,0710	0,0353	19:10	73,7
0,5240	0,3696	0,1181	0,0588	19:25	74,4
0,4325	0,3050	0,0807	0,0401	19:40	74,9
0,2857	0,2015	0,0361	0,0180	19:55	75,2
0,1985	0,1400	0,0174	0,0086	20:10	75,5
0,1943	0,1371	0,0166	0,0083	20:26	74,8
0,3136	0,2212	0,0433	0,0215	20:41	74,8

## Príloha 12

Namerané hodnoty pre optickú distribučnú sieť 1:8

PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ nm*km]	Čas	Teplota [°C]
0,2785	0,1950	0,0359	0,0176	12:21	16,1
0,3169	0,2219	0,0466	0,0229	12:36	13,0
0,2906	0,2035	0,0392	0,0192	18:52	31,1
0,2527	0,1770	0,0295	0,0145	19:07	34,1
0,1709	0,1197	0,0135	0,0066	19:22	37,6
0,2361	0,1653	0,0256	0,0125	19:37	42,0
0,2357	0,1650	0,0254	0,0124	19:52	46,6
0,2231	0,1562	0,0227	0,0111	20:07	51,5
0,3026	0,2119	0,0415	0,0203	20:22	55,4
0,2692	0,1885	0,0327	0,0161	20:37	58,6
0,3102	0,2172	0,0433	0,0212	20:53	61,5
0,3290	0,2304	0,0487	0,0239	21:08	64,0
0,3356	0,2350	0,0504	0,0247	21:23	66,0
0,2928	0,2050	0,0379	0,0186	21:38	68,1
0,2462	0,1724	0,0268	0,0131	21:53	69,1
0,2573	0,1801	0,0294	0,0144	22:08	70,5
0,2804	0,1963	0,0345	0,0169	22:23	72,2
0,2489	0,1743	0,0276	0,0135	22:38	73,5
0,2661	0,1863	0,0310	0,0152	22:53	74,8
0,2033	0,1424	0,0182	0,0089	23:08	75,7
0,3271	0,2290	0,0470	0,0230	23:23	76,3
0,4616	0,3230	0,0948	0,0465	23:38	76,7
0,3968	0,2778	0,0701	0,0344	23:53	77,0

## Príloha 13

Namerané hodnoty pre delič 1:8

PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ km <sup>1/2</sup> ]	PMD hodnota, 2-ho rádu [ps/ nm]	PMD koeficient, 2-ho rádu [ps/ nm* km]	Čas	Teplota [°C]
0,3767	0,2650	0,0620	0,0307	8:00	16,0
0,2742	0,1930	0,0327	0,0162	8:15	13,2
0,3667	0,2580	0,0583	0,0289	8:30	8,7
0,4018	0,2827	0,0700	0,0346	8:45	5,4
0,3815	0,2684	0,0631	0,0312	9:00	1,9
0,3706	0,2608	0,0595	0,0295	9:15	-0,7
0,3725	0,2621	0,0600	0,0297	9:30	-4,8
0,3785	0,2663	0,0633	0,0314	9:45	-7,9
0,3693	0,2599	0,0602	0,0298	10:01	-12,0
0,4120	0,2899	0,0749	0,0371	10:16	-14,8
0,3932	0,2767	0,0682	0,0338	10:31	-18,8
0,4165	0,2930	0,0765	0,0379	10:46	-20,2
0,3519	0,2476	0,0547	0,0271	11:01	-17,4
0,3652	0,2569	0,0582	0,0288	11:16	-13,8
0,3634	0,2557	0,0571	0,0283	11:31	-10,0
0,3643	0,2563	0,0588	0,0291	11:46	-6,4
0,3608	0,2538	0,0564	0,0279	12:01	-3,0
0,3448	0,2426	0,0517	0,0256	12:16	1,1
0,3004	0,2114	0,0391	0,0194	12:31	3,5
0,2877	0,2025	0,0360	0,0178	12:46	6,6
0,2928	0,2060	0,0373	0,0184	13:02	12,0
0,4297	0,3024	0,0802	0,0397	13:17	15,9
0,3411	0,2400	0,0514	0,0255	13:32	19,1
0,4008	0,2820	0,0698	0,0346	13:47	20,4
0,4207	0,2960	0,0783	0,0387	14:02	23,9
0,4785	0,3367	0,0995	0,0493	14:17	29,2
0,5389	0,3792	0,1259	0,0623	14:32	33,8
0,5637	0,3966	0,1381	0,0683	14:47	37,9
0,4882	0,3435	0,1048	0,0519	15:02	40,9
0,4469	0,3144	0,0878	0,0435	15:18	42,1
0,4610	0,3243	0,0923	0,0457	15:33	45,1
0,3973	0,2795	0,0686	0,0340	15:48	48,4
0,4055	0,2853	0,0713	0,0353	16:03	52,4
0,3399	0,2391	0,0501	0,0248	16:18	57,5
0,3252	0,2288	0,0459	0,0227	16:33	62,1
0,3144	0,2212	0,0427	0,0212	16:48	66,2
0,3907	0,2749	0,0660	0,0327	17:03	69,7
0,4402	0,3097	0,0848	0,0420	17:19	69,6
0,4182	0,2943	0,0768	0,0380	17:34	69,3
0,4186	0,2945	0,0769	0,0381	17:49	69,4
0,2979	0,2096	0,0388	0,0192	18:04	70,1
0,3124	0,2198	0,0426	0,0211	18:19	71,1
0,3315	0,2333	0,0481	0,0238	18:34	72,7
0,2684	0,1889	0,0314	0,0155	18:49	74,7
0,2675	0,1882	0,0309	0,0153	19:05	76,3
0,3954	0,2782	0,0684	0,0339	19:20	76,9
0,3932	0,2767	0,0679	0,0336	19:35	77,3