

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Zjištění vlivu tepelného namáhání na parametry optického
coupleru**

Determine the effect of thermal stress on the optical coupler

2017

Emil Bednár

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Emil Bednár**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Zjištění vlivu tepelného namáhání na parametry optického coupleru**
Determine the effect of thermal stress on the optical coupler

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je zjistit vliv tepelného namáhání při určité teplotě po různé dlouhé časové intervaly. Zkoumané parametry optického coupleru jsou vložný útlum, zbytkový útlum, dělicí poměr, homogenita ztrát a směrovost.

1. Teoretický rozbor optických sítí
2. Teoretický rozbor optického coupleru a jeho parametrů.
3. Popis zatěžování optického coupleru teplem.
4. Popis měření útlumových parametrů optického coupleru.
5. Měření optického coupleru při tepelném namáhání.
6. Vyhodnocení změnových charakteristik optického coupleru.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] DERICKSON, Dennis. Fiber optic test and measurement. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, c1998, xx, 642 p. ISBN 0135343305.
- [2] DUTTA K., Achyut a Masahiko FUJIWARA. WDM technologies: passive optical components. Amsterdam: Academic Press, c2003, xix, 513 s. ISBN 0122252624.
- [3] VENGHAUS, Herbert a Norbert GROTE. Fibre optic communication: key devices. New York: Springer, c2012, xxx, 680 p. Springer series in optical sciences, v. 161. ISBN 9783642205170.
- [4] KARTALOPOULOS, Stamatios V. Introduction to DWDM technology: data in a rainbow. Bellingham, Wash.: SPIE Optical Engineering Press, c2000, xxii, 252 p. ISBN 0780353994.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Bednárek**


Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry






prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: *18. apríla 2017*


.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval pánovi Ing. Lukášovi Bednárkovi za cenné rady, odbornú pomoc a konzultáciu pri spracovaní tejto bakalárskej práce.

Abstrakt

Celá táto bakalárska práca sa zaoberá pasívnymi optickými rozbočovačmi, alebo aj couplermi, ktoré sú vystavené tepelnému namáhaniu. Cieľom práce je priblížiť si coupler a optické siete po teoretickej stránke a zistiť ako vplýva tepelné namáhanie na jednotlivé útlmové parametre couplerov. V prvej časti práce, ktorá je teoretická, sa zoznámime s jednotlivými parametrami a vlastnosťami optických sietí a couplerov, ktoré sú neoddeliteľnou súčasťou optických sietí. V praktickej časti sa už zaoberáme samotným pôsobením tepelného namáhania na parametre optických couplerov. Významnými parametrami merania sú celkové straty, vložné útlmy, homogenita strát, deliace pomery a smerovosti. Keďže sme umiestnili couplery pod stále tepelné namáhanie predpokladáme postupné zvyšovanie útlmu. Jedná sa však len o prvotný pohľad na túto problematiku.

Kľúčové slová

optický coupler, optická sieť, vložný útlm, tepelné namáhanie

Abstract

The whole bachelor thesis concerns with passive optical splitters or couplers which are exposed to thermal stress. The aims of this work are a theoretical description of the coupler and optical networks and finding the influence of thermal stress on the individual attenuation parameters of couplers. In the first part which is theoretical, we specify individual parameters and properties of optical networks and couplers which are an integral part of optical systems. The practical part is already engaged in the effect of thermal stress on parameters of optical couplers. Important parameters of measurements are total losses, insertion losses, homogeneity of the losses, split ratios and directionalities. We expect a gradual increase in attenuation while couplers are placed under thermal stress. However, this is only the initial view into this issue.

Key words

optical coupler, optical network, insertion loss, thermal stress

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Optické siete.....	- 2 -
1.1 Základné delenie optických prístupových sietí.....	- 2 -
1.1.1 Základné komponenty optických prístupových sietí.....	- 2 -
1.1.2 Špecifikácia prenosu optického signálu v prístupovej sieti.....	- 2 -
1.1.3 Rozdelenie podľa typu prenosového média.....	- 3 -
1.1.4 Rozdelenie podľa možnosti zdieľania použitých prostriedkov.....	- 4 -
1.1.5 Rozdelenie podľa typu optickej distribučnej siete.....	- 4 -
1.2 Pasívne optické siete (Passive Optical Network).....	- 4 -
1.2.1 APON (ATM PON podľa ITU-T G.983).....	- 4 -
1.2.2 BPON (Broadband PON podľa ITU-T G.983).....	- 5 -
1.2.3 GPON (Gigabit PON podľa ITU-T G.984).....	- 5 -
1.2.4 EPON (Ethernet PON podľa IEEE 802,3ah).....	- 5 -
1.2.5 10GEPON (10 Gigabit EPON podľa IEEE 802.3av).....	- 5 -
1.2.6 WDM - PON.....	- 6 -
2 Optické couplere.....	- 9 -
2.1 Rozdelenie couplerov.....	- 9 -
2.1.1 Couplere podľa zdroju napájania.....	- 9 -
2.1.2 Couplere podľa výrobného procesu.....	- 9 -
2.1.3 Couplere podľa rozbočovacieho pomeru.....	- 9 -
2.2 FBT (Fused Biconic Taper) couplere.....	- 11 -
2.2.1 Výrobný proces.....	- 11 -
2.2.2 Typy FBT couplerov.....	- 12 -
2.2.3 Výhody.....	- 13 -
2.2.4 Nevýhody.....	- 13 -
2.3 PLC (Planar Lightwave Circuit) couplere.....	- 13 -
2.3.1 Výrobný proces.....	- 13 -
2.3.2 Výhody.....	- 14 -
2.3.3 Nevýhody.....	- 14 -
3 Meranie.....	- 15 -
3.1 Meranie výkonu optických couplerov.....	- 15 -

3.1.1	Počiatkové meranie.....	- 15 -
3.1.2	Meranie s tepelným namáhaním.....	- 16 -
3.2	Vložný útlm.....	- 16 -
3.3	Deliaci pomer.....	- 17 -
3.4	Celkové straty.....	- 17 -
3.5	Homogenita strát.....	- 18 -
3.6	Smerovosť.....	- 18 -
4	Spracovanie nameraných hodnôt.....	- 20 -
4.2	Gezhi 10:90.....	- 21 -
4.2.1	Vložný útlm.....	- 21 -
4.2.2	Deliaci pomer.....	- 22 -
4.2.3	Celkové straty.....	- 23 -
4.2.4	Homogenita strát.....	- 24 -
4.2.5	Smerovosť.....	- 25 -
4.2.6	Zhodnotenie, hodnoty aproximácie.....	- 26 -
4.3	Gezhi 1:99.....	- 27 -
4.3.1	Vložný útlm.....	- 27 -
4.3.2	Deliaci pomer.....	- 28 -
4.3.3	Celkové straty.....	- 29 -
4.3.4	Homogenita strát.....	- 30 -
4.3.5	Smerovosť.....	- 31 -
4.3.6	Zhodnotenie, hodnoty aproximácie.....	- 32 -
4.4	Gezhi 50:50.....	- 33 -
4.4.1	Vložný útlm.....	- 33 -
4.4.2	Deliaci pomer.....	- 34 -
4.4.3	Celkové straty.....	- 35 -
4.4.4	Homogenita strát.....	- 36 -
4.4.5	Smerovosť.....	- 37 -
4.4.6	Zhodnotenie, hodnoty aproximácie.....	- 38 -
4.5	Optokon 10:90.....	- 39 -
4.5.1	Vložný útlm.....	- 39 -
4.5.2	Deliaci pomer.....	- 40 -
4.5.3	Celkové straty.....	- 41 -

4.5.4	Homogenita strát	- 42 -
4.5.5	Smerovosť	- 43 -
4.5.6	Zhodnotenie, koeficient aproximácie	- 44 -
4.6	Optokon 1:99.....	- 45 -
4.6.1	Smerovosť	- 45 -
4.6.2	Zhodnotenie, hodnoty aproximácie	- 46 -
4.7	Optokon 50:50.....	- 47 -
4.7.1	Vložný útlm.....	- 47 -
4.7.2	Deliaci pomer	- 48 -
4.7.3	Celkové straty.....	- 49 -
4.7.4	Homogenita strát	- 50 -
4.7.5	Smerovosť	- 51 -
4.7.6	Zhodnotenie, hodnoty aproximácie	- 52 -
	Záver	- 53 -
	Použitá literatúra	- 54 -
	Zoznam príloh.....	- 55 -

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
P	W	Výkon
λ	nm	Vlnová dĺžka

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line (asymetrická digitálna účastnícka prípojka)
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing (hrubý vlnový multiplex)
DSL	Digital Subscriber Line (digitálna účastnícka prípojka)
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing (hustý vlnový multiplex)
FBT	Fused Biconic Taper
FDM	Frequency Division Multiplexing (frekvenčný multiplex)
MAC	Media Access Control (riadenie prístupu k médiu)
OLT	Optical Line Termination (optické linkové zakončenie)
ONU	Optical Network Unit (optické sieťové jednotky)
ODN	Optical Distribution Network (optická distribučná sieť)
ONT	Optical Network Termination (optické sieťové zakončenie)
PDL	Polarization Dependent Loss (polarizačno-závislé straty)
PLC	Planar Lightwave Circuit (
PON	Passive Optical Network (pasívna optická sieť)
P2P	Point-to-point (bod-bod)
P2MP	Point-to-multipoint (bod-viacbodov)
SDM	Space Division Multiplexing
TDM	Time Division Multiplexing (časový multiplex)
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line (vysokorýchlostná digitálna účastnícka prípojka)
WDM	Wavelength Division Multiplexing (vlnový multiplex)

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Zoznam ilustrácií a zoznam tabuliek

Číslo ilustrácie	Názov ilustrácie	Číslo stránky
1.1	Rozloženie kanálov CWDM	6
1.2	Varianty hustého vlnového multiplexu	8
2.1	Rozbočovač 1:2	10
2.2	3-portový zlučovač	10
2.3	X coupler	10
2.4	Hviezdicový coupler	10
2.5	Stromový coupler realizovaný pomocou optických rozbočovačov	11
2.6	Výroba optického coupleru metódou FBT	12
2.7	Optický coupler realizovaný kaskádovým zapojením	12
2.8	PLC coupler	14
3.1	Schéma počiatočného merania	16
3.2	Schéma merania výkonu s tepelným namáhaním	16
3.3	Schéma merania smerovosti	19
4.1	Graf vložného útlmu pre coupler Gezhi 10:90	21
4.2	Graf deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 10:90	22
4.3	Graf celkových strát pre coupler Gezhi 10:90	23
4.4	Graf homogenity strát pre coupler Gezhi 10:90	24
4.5	Graf smerovosti pre coupler Gezhi 10:90	25
4.6	Graf vložného útlmu pre coupler Gezhi 1:99	27
4.7	Graf deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 1:99	28
4.8	Graf celkových strát pre coupler Gezhi 1:99	29
4.9	Graf homogenity strát pre coupler Gezhi 1:99	30
4.10	Graf smerovosti pre coupler Gezhi 1:99	31
4.11	Graf vložného útlmu pre coupler Gezhi 50:50	33
4.12	Graf deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 50:50	34
4.13	Graf celkových strát pre coupler Gezhi 50:50	35
4.14	Graf homogenity strát pre coupler Gezhi 50:50	36

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.15	Graf smerovosti pre coupler Gezhi 50:50	37
4.16	Graf vložného útlmu pre coupler Optokon 10:90	39
4.17	Graf deliaceho pomeru pre coupler Optokon 10:90	40
4.18	Graf celkových strát pre coupler Optokon 10:90	41
4.19	Graf homogenity strát pre coupler Optokon 10:90	42
4.20	Graf smerovosti pre coupler Optokon 10:90	43
4.21	Graf smerovosti pre coupler Optokon 1:99	45
4.22	Graf vložného útlmu pre coupler Optokon 50:50	47
4.23	Graf deliaceho pomeru pre coupler Optokon 50:50	48
4.24	Graf celkových strát pre coupler Optokon 50:50	49
4.25	Graf homogenity strát pre coupler Optokon 50:50	50
4.26	Graf smerovosti pre coupler Optokon 50:50	51

Číslo tabuľky	Názov tabuľky	Číslo stránky
4.1	Koeficient determinácie vložného útlmu pre coupler Gezhi 10:90	21
4.2	Koeficient determinácie deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 10:90	23
4.3	Koeficient determinácie celkových strát pre coupler Gezhi 10:90	24
4.4	Koeficient determinácie homogenity strát pre coupler Gezhi 10:90	24
4.5	Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Gezhi 10:90	25
4.6	Hodnoty koeficientu aproximácie pre coupler Gezhi 10:90	26
4.7	Koeficient determinácie vložného útlmu pre coupler Gezhi 1:99	27
4.8	Koeficient determinácie deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 1:99	29
4.9	Koeficient determinácie celkových strát pre coupler Gezhi 1:99	29
4.10	Koeficient determinácie homogenity strát pre coupler Gezhi 1:99	30

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.11	Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Gezhi 1:99	31
4.12	Hodnoty koeficientu aproximácie pre coupler Gezhi 1:99	32
4.13	Koeficient determinácie vložného útlmu pre coupler Gezhi 50:50	33
4.14	Koeficient determinácie deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 50:50	35
4.15	Koeficient determinácie celkových strát pre coupler Gezhi 50:50	36
4.16	Koeficient determinácie homogenity strát pre coupler Gezhi 50:50	36
4.17	Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Gezhi 50:50	37
4.18	Hodnoty koeficientu aproximácie pre coupler Gezhi 50:50	38
4.19	Koeficient determinácie vložného útlmu pre coupler Optokon 10:90	40
4.20	Koeficient determinácie deliaceho pomeru pre coupler Optokon 10:90	41
4.21	Koeficient determinácie celkových strát pre coupler Optokon 10:90	42
4.22	Koeficient determinácie homogenity strát pre coupler Optokon 10:90	42
4.23	Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Optokon 10:90	43
4.24	Hodnoty koeficientu aproximácie pre coupler Optokon 10:90	44
4.25	Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Optokon 1:99	45
4.26	Hodnoty koeficientu aproximácie smerovosti pre coupler Optokon 1:99	46
4.27	Koeficient determinácie vložného útlmu pre coupler Optokon 50:50	48
4.28	Koeficient determinácie deliaceho pomeru pre coupler Optokon 50:50	49

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.29	Koeficient determinácie celkových strát pre coupler Optokon 50:50	50
4.30	Koeficient determinácie homogenity strát pre coupler Optokon 50:50	50
4.31	Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Optokon 50:50	51
4.32	Hodnoty koeficientu aproximácie pre coupler Optokon 50:50	52

Úvod

Cieľom tejto bakalárskej práce je zistenie ako sa správajú optické couplere, ktoré spolu umiestnime do priestoru, kde je nepretržitá teplota 95°C. Pre lepšie porovnanie máme k dispozícii tri couplere od českého výrobcu s rôznym deliacim pomerom a tri couplere od čínskeho výrobcu s rovnakým deliacim pomerom ako u couplerov od českého výrobcu.

Keďže couplere sú prvkami optických sietí, v prvej kapitole si priblížime základnú charakteristiku týchto sietí, používané prvky, ale aj jednotlivé typy pasívnych optických sietí postupne ako sa zvyšovali prenosové rýchlosti a zlepšovala sa dostupnosť týchto sietí.

V druhej kapitole si priblížime optické couplere. Priblížime si ich charakteristiku, podľa čoho ich rozdeľujeme a na čo sa používajú v optických sieťach jednotlivé typy optických couplerov. Zoznámime sa s dvoma základnými metódami ako sa optické couplere vyrábajú a jednotlivé výhody a nevýhody pre každú výrobnú metódu.

Po zoznámení sa s teóriou sa dostávame k praktickej časti tejto bakalárskej práce. Tu sa zoznámime s tým, ako prebiehalo meranie jednotlivých couplerov, či už sa jedná o ich zapojenie pri meraní, alebo postup pri meraní. Oboznámime sa s dosiahnutými výsledkami pri meraní jednotlivých couplerov, ich prevedením do grafov a zhodnotením, ktoré couplere lepšie obstáli tepelnú záťaž, ktorá na ne pôsobila po dobu približne siedmich mesiacov.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

1 Optické siete

Aj pri neustálom zlepšovaní parametrov existujúcich digitálnych účastníckych prípojok typu xDSL, z ktorých je dnes najznámejšia ADSL2+ a VDSL2, je zrejmé že z dlhodobého hľadiska sú ich ďalšie možnosti, najmä vo zvyšovaní dosiahnuteľných prenosových rýchlostí s využitím metalických vedení obmedzené. S rozvojom nových technológií a narastajúcimi aktívnymi užívateľmi Internetu dochádza k neustálemu rastu požiadaviek na prenosovú rýchlosť, nízku odozvu a stratovosť rámcov/paketov. Jedným z prostriedkov ako poskytnúť koncovému používateľovi potrebnú šírku pásma, ktorá ovplyvňuje prenosovú rýchlosť, je využitie optických technológií, ktoré boli najskôr nasadzované len v chrbticových spojoch a budovanie optických prístupových sietí. Na prenos informácií v optických sieťach sa najčastejšie používa neviditeľné infračervené spektrum.

1.1 Základné delenie optických prístupových sietí

Optické siete môžeme rozdeliť podľa viacerých spôsobov, rovnako ako všetky telekomunikačné siete. Uvedme si rozdelenie podľa primárne sledovaných aspektov, ktoré odrážajú rozdelenie optických sietí z rôznych pohľadov do viacerých skupín. Pre lepšie pochopenie si najskôr definujeme obecné zloženie optického prístupového systému a špecifikácie prenosu optického signálu v prístupovej sieti.

1.1.1 Základné komponenty optických prístupových sietí

Komponenty v optických prístupových sieťach podľa: [1]

- **Optické linkové zakončenie (Optical Line Termination - OLT)**
Zaisťuje funkcie sieťového rozhrania medzi prístupovou sieťou a sieťami telekomunikačných služieb (Internet, dátové siete, atď)
- **Optické sieťové jednotky (Optical Network Unit – ONU)**
Zabezpečujú funkcie rozhrania medzi optickou a metalickou časťou prístupovej siete.
- **Optická distribučná sieť (Optical Distribution Network – ODN)**
Súbor optických prenosových prostriedkov medzi OLT a jednotkami ONU.
- **Optické sieťové zakončenie (Optical Network Termination – ONT)**
Zabezpečujú funkcie účastníckeho rozhrania medzi koncovými zariadeniami účastníkov a prístupovou sieťou.

1.1.2 Špecifikácia prenosu optického signálu v prístupovej sieti

Keďže chceme dosiahnuť čo najrýchlejší prenos s čo najväčším počtom účastníkov, používame obojsmerný alebo aj duplexný prenos. Signály duplexným režimom môžu byť prenášané viacerými variantami:

- **SDM (Space Division Multiplexing)**
Táto varianta používa pre jeden smer prenosu jedno vlákno.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

- ***WDM (Wavelength Division Multiplexing)***

Signály sa prenášajú po jednom vlákne ale s rozdielnou vlnovou dĺžkou. Tento prenos sa ešte rozdeľuje podľa vzdialeností jednotlivých nosných od seba na hrubé delenie (Coarse WDM) a husté delenie (Dense WDM).

- ***FDM (Frequency Division Multiplexing)***

Signály, ktoré sú prenášané po jednom vlákne, sú navzájom oddelené pri prenose použitím rôznych frekvencií.

- ***TDM (Time Division Multiplexing)***

Signály od používateľov sú prenášané po spoločnom vlákne s tým, že jednotlivé signály od používateľov sú vysielané len v krátkych časových intervaloch, nazývaných časové sloty. Takto zabezpečíme oddelenie signálov od seba s nežiadúcim odposluchom ďalšími účastníkmi.

1.1.3 Rozdelenie podľa typu prenosového média

Optické vlákno je dielektrický vlnovod, ktorý pracuje na princípe totálneho odrazu na rozhraní dvoch prostredí s rôznym indexom lomu, kde jadro optického vlákna má väčšiu hodnotu indexu lomu ako plášť, čo zaisťuje šírenie optického signálu pozdĺž osi vlákna. Optické vlákno je najrýchlejší typ média pre prenos dát, ktorý má množstvo výhod či už je to bezpečnosť pri prenose, nízky útlm, odolnosť voči elektromagnetickým rušeniam, životnosť ale aj bezpečné použitie v nebezpečných prostrediach či už horľavých alebo výbušných. Podľa toho koľko optických signálov (vidov) širíme vo vlákne rozlišujeme optické vlákna na jednovidové a mnohovidové.

- ***Jednovidové vlákna (Single-mode)***

Vlákno určené pre prenos jedného optického signálu. Majú skokový index lomu medzi rozhraním optického jadra a plášťa. Optický signál sa tu šíri na princípe totálneho odrazu ideálne s rovnakou rýchlosťou po celej svojej dráhe. [2]

- ***Mnohovidové vlákna (Multi-mode)***

Určené pre prenos viacerých optických signálov naraz. Z pohľadu prevedenia sa rozdeľujú podľa profilov indexu lomu jadra na:

- Vlákna so skokovým indexom lomu - obsahujú ostrý prechod indexu lomu medzi optickým jadrom a plášťom vlákna avšak vzniká tu oneskorenie príchodu signálov do cieľa, pretože každý signál má inú dráhu pri šírení optickým jadrom - tkz. módová disperzia.
- Vlákna s gradientným indexom lomu - rozdiel medzi indexom lomu jadra a plášťa je plynulý. "Jadro vlákna je tvorené z tenkých vrstvičiek s navzájom plynule meniacim sa indexom lomu"[2]. Tieto vlákna sú určené na potlačenie módovej disperzie.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

1.1.4 Rozdelenie podľa možnosti zdieľania použitých prostriedkov

- ***Bod-bod (P2P)***

Individuálne spoje realizované na dvojici optických vlákien, kde na každom konci je samostatná komunikačná jednotka. Používa sa najmä k pripojeniu zákazníkov (spoločností) s veľkými nárokmi na prenosovú kapacitu.

- ***Bod-viac bodov (P2MP)***

Prístupová infraštruktúra je zdieľaná väčším počtom účastníkov. Toto zapojenie pracuje na princípe rozbočovačov, ktoré signál iba odošlú do svojich výstupov bez ďalšej úpravy. Tá sa prevedie až v ONU, ktorá vyfiltruje rámce podľa MAC adresy ONT, a pošle jej ich. Pri upstreame sa dáta z ONT v ONU vložia do časových slotov a tie sú odosielané cez rozbočovače, ktoré ukládajú tieto časové sloty do optického vlákna od poskytovateľa. Toto spojenie je typické práve pre prístupovú sieť a prináša efektívnejšie riešenie prenosu.

1.1.5 Rozdelenie podľa typu optickej distribučnej siete

- ***Aktívne optické siete***

Tvoria základ pre hybridné siete, obsahujú vo svojej distribučnej sieti aspoň jeden aktívny prvok, čo je zariadenie ktoré potrebuje k svojej funkcii napájanie. Typickým príkladom aktívneho prvku je zosilňovač optického signálu.

- ***Pasívne optické siete***

Obsahuje len prvky, ktoré k svojim funkciám nepotrebujú napájanie. Typickými prvkami pre pasívne optické siete sú couplere, OLT, ODN. Týmto sieťam sa budeme podrobnejšie zaoberať v nasledujúcej kapitole.

1.2 Pasívne optické siete (Passive Optical Network)

V tejto kapitole si priblížime jednotlivé typy pasívnych optických sietí a ich prenosové rýchlosti podľa [2].

1.2.1 APON (ATM PON podľa ITU-T G.983)

Prvá pasívna optická sieť ktorá bola štandardizovaná v roku 1998, ktorá ponúkala pripojenie až 32 koncových užívateľov (logicky 64) na vzdialenosť 20 km. Základný prenos bol sprostredkovaný pomocou ATM buniek v dvoch variantách prenosu:

- ***Symetrický prenos***

Tento prenos dosahoval v smere upstream aj downstream rýchlosť 155,52 Mbit/s.

- ***Asymetrický prenos***

Asymetrický prenos mal vyššiu rýchlosť v downstreame 622,08 Mbit/s, v upstreame rýchlosť ostala nezmenená 155,52 Mbit/s.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

1.2.2 BPON (Broadband PON podľa ITU-T G.983)

Ide o rozšírenie predchádzajúceho štandardu z roku 2001, ktorá ako prvá prekonalá rýchlosť 1Gbit/s. Cieľom BPON bolo zvýšenie prenosových rýchlostí v upstreame na 622,08 Mbit/s a neskôr v roku 2003 aj v downstreame až na 1244,16 Mbit/s. Maximálny počet pripojených užívateľov je 32 a dosah je 20 km, teda rovnaký ako u siete APON.

1.2.3 GPON (Gigabit PON podľa ITU-T G.984)

Ide o úplne nový typ pasívnej optickej siete, ktorá sa objavila prvý krát v roku 2003, následne však boli rôzne parametre upravované a rozšírené. Prenos rámcov pomocou ATM protokolu, ktorý bol používaný v sieťach APON a BPON, už nebol vhodný vzhľadom na jeho veľkosť záhlavia a spôsobu zapúzdrenia, preto bol navrhnutý nový prenosový protokol GEM (GPON Encapsulation Method), ktorý podporuje prenos aj pomocou ATM buniek. Rýchlosť prenosu dosahovala v downstreame 2488,32 Mbit/s. Táto rýchlosť bola navrhnutá aj na upstream spolu s rýchlosťou 1244,16 Mbit/s s tým, že konkrétne špecifikácie pre rýchlosť 2488,32 Mbit/s budú doplnené neskôr. To sa však nerealizovalo lebo pre väčšinu aplikácií rýchlosť 1244,16 Mbit/s pre upstream bola dostatočná.

1.2.4 EPON (Ethernet PON podľa IEEE 802,3ah)

Už podľa názvu môžeme zistiť, že sa stretávame s PON, ktorá využíva technológiu Ethernet, ktorá je veľmi rozšírená. To aj dáva veľkú výhodu EPON, že nepotrebuje robiť zložité konverzácie protokolov a zapúzdrenie užívateľských dát pre ich prenos pasívnou optickou sieťou čo zjednodušuje samotný návrh siete a realizáciu koncových jednotiek. Avšak s týmito výhodami prináša EPON aj nevýhody Ethernetu, ako je orientácia len na jednoduché dátové prenosy, keďže Ethernet bol navrhnutý pre LAN.

S EPON sa môžeme stretnúť v dvoch typoch - 1000BASE-PX10 a s 1000BASE-PX20. V praxi však bývajú označované aj ako EPON typ 1 (PX10) a EPON typ 2 (PX20). Rýchlosť prenosu majú rovnakú 1250 Mbit/s pre upstream aj downstream. Rozdiel je v maximálnej vzdialenosti, pre PX10 je to 10 km a pre PX20 je to 20 km, pri maximálnom počte pripojených užívateľov, PX10 - 16 a PX20 - 32, v rozsahu útlmu. Podľa [2] sa vlnové dĺžky pri prenose používajú pre obidve varianty rovnaké. Pri prenose v smere upstream sa používajú vlnové dĺžky v rozsahu 1260 - 1360 nm a pri zostupnom smere sa používa rozsah vlnových dĺžok 1480 - 1500 nm.

1.2.5 10GEPON (10 Gigabit EPON podľa IEEE 802.3av)

Ďalšia varianta EPON, ktorá zvyšuje rýchlosť prenosu a ako prenosový protokol používa Ethernet. V súvislosti s 10GPON sa môžeme stretnúť v 2 variantách: symetrickou, tiež označovanou ako 10GBASE-PR, a asymetrickou označovanou 10/1GBASE-PRX. Symetrická varianta dosahuje v oboch smeroch prenosu 10,3125 Gbit/s, kdežto pri asymetrickom prenose je rýchlosť upstreamu 1,25 Gbit/s, čo je rovnaká rýchlosť ako pri EPON čo nám poskytuje spätnú kompatibilitu s koncovými jednotkami EPON. V minulosti podľa [3] EPON a 10GEPON pracovali v smere upstream na rovnakých vlnových dĺžkach okolo 1300nm. Pre oddelenie variant od seba sa používal časový multiplex. Tento princíp delenia sa nazýva dvojrychlostný dávkový mód (dual-rate-burst mode), lebo najskôr dochádza k časovému deleniu medzi EPON a 10GEPON a neskôr k pridelovaniu časových intervalov medzi účastníkov. Dnes už je pre sieť 10GEPON na oddelenie od EPON

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

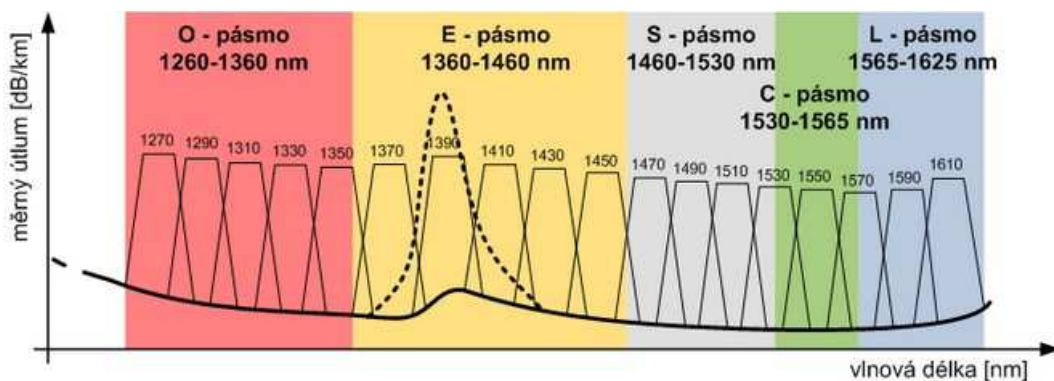
pre 10GBASE-PR vyhradené pásmo pre upstram 1260 - 1280 nm, pre asymetrickú variantu 10/1GBASE-PRX je vyhradené pásmo 1260 - 1360 nm. Pre downstream sa od začiatku používa rozsah 1575 - 1580. [2]

1.2.6 WDM - PON

Doteraz sa používali rôzne vlnové dĺžky len na oddelenie upstreamu a downstreamu a na prenos sa používal časový multiplex. Práve táto PON poskytuje pre prenos dát vlnový multiplex, ktorý dovoľuje prenášať desiatky až stovky optických signálov pomocou jedného optického vlákna. Dané signály sú od seba oddelené použitím rôznych vlnových dĺžok. Podľa toho aký je odstup jednotlivých vlnových dĺžok, teda jednotlivých prenosových kanálov, rozdeľujeme vlnový multiplex na hrubý vlnový multiplex CWDM a hustý vlnový multiplex DWDM. Popríklad môže byť použitá kombináciu časového a vlnového multiplexu (TWDM), kde by boli pevne pridelené vlnové dĺžky a pomocou vlnových filtrov na koncových jednotkách by boli jednotlivé vlnové dĺžky filtrované. Pri použití TWDM sa ešte zvýši možný počet pripojených jednotiek tým, že jednu vlnovú dĺžku môžeme prideliť viacerým jednotkám a jednotlivé prenosy oddeľovať časovým multiplexovaním. Najväčšou nevýhodou je pevné pridelenie vlnových dĺžok optickým jednotkám, pretože pri nevyužití niektorej vlnovej dĺžky (neaktivita koncovej jednotky) nebude možné použitie tejto vlnovej dĺžky pre komunikáciu iných koncových jednotiek. Dôvodom sú pevne nastavené vlnové filtre, optické zdroje a detektory pre danú optickú jednotku.[2]

- **CWDM (Coarse WDM)**

Táto metóda vlnového multiplexu dovoľuje prenášať viacero optických signálov, ktoré majú presne definované, ktorá vlnová dĺžka je použitá pre jednotlivý prenosový kanál. Už podľa názvu môžeme zistiť, že jednotlivé kanály budú od seba viac vzdialené ako pri metóde DWDM. Stred prvého nosného kanálu bol definovaný na vlnovej dĺžke 1271 nm a posledný na dĺžke 1611 nm. Rozdiel medzi jednotlivými nosnými vlnovými dĺžkami je 20 nm s toleranciou $\pm 6-7$ nm. Jednotlivé rozloženie kanálov môžeme vidieť na obrázku 1.1.



Obrázok 1.1: Rozloženie kanálov CWDM

Taktiež si môžeme všimnúť že jednotlivé pásma, do ktorých sú rozdelené prenosové kanály majú iný merný útlm. Preto sa v praxi obvykle obmedzujú kanály S, C, L pre použitie na dlhšie vzdialenosti a kanály v pásme O a E pre lokálne a metropltné siete. Väčší rozdiel medzi vlnovými dĺžkami jednotlivých kanálov a dostatočná tolerancia dovoľuje použitie lacnejších optických zdrojov,

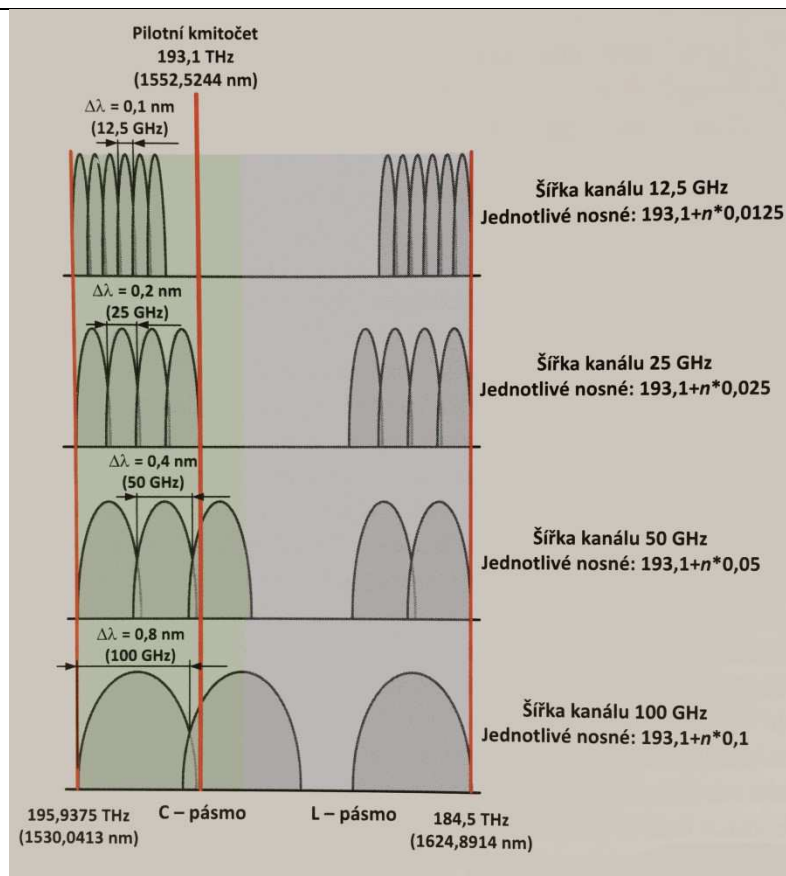
Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

ktoré nepotrebujú chladenie, majú nižšiu presnosť a stabilitu vlnovej dĺžky generovaného žiarenia. Vďaka tomu nie je implementácia taká náročná a je jednoduchšia ako pri metóde DWDM. Avšak tým, že sa dá využiť maximálne 18 kanálov ponúka táto metóda multiplexovania menšiu efektivitu prenosu ako metóda DWDM. [2]

- **DWDM (Dense WDM)**

Ďalšou metódou pre vlnový multiplex, je hustý vlnový multiplex niekedy nazývaný aj jemný. Jednotlivé kanály sú od seba vzdialené rádovo v desatinách nanometrov podľa použitej frekvencie pre šírku pásma. Jednotlivé varianty hustého vlnového multiplexu s prehľadom kanálov môžeme vidieť na obrázku 1.2. Aby sme zaistili čo najlepší prenos musíme použiť pásma kde je merný útlm čo najmenší, preto sa pri tejto variante používajú len pásma C a L. Pri použití varianty so šírkou kanálu 100 GHz sa používa 32 prenosových kanálov v pásme C a ďalších 32 v pásme L. Keďže sa nám pri ďalšej variante zmenšila šírka kanálu na polovicu, teda na 50 GHz, počet prenosových kanálov sa nám zdvojnásobí. Teda v pásme C sa používa 64 prenosových kanálov a v pásme L je to 64 prenosových kanálov. Pri šírke kanálu 25 GHz sa nám opäť zdvojnásobí počet kanálov oproti variante so šírkou kanálu 50 GHz, takže sa ich používa v pásme C 128 a v pásme L ich je rovnako 128. Posledná varianta s najjemnejším odstupom a šírkou kanálu len 12,5 GHz obsahuje v pásme C 256 prenosových kanálov a v pásme L sa ich nachádza taktiež 256. Keďže je vzdialenosť medzi kanálmi minimálna, musí byť k tomu použitá aj patrične malá tolerancia vlnovej dĺžky nosných kanálov a veľmi presné a stabilné prístroje. Na rozdiel od zdrojov žiarenia, ktoré sa používajú pri CWDM a nepotrebujú aktívne chladenie, pre optické zdroje pri DWDM je aktívne chladenie nutné. Tým sa nám celkové náklady na prevádzku niekoľkokrát znásobia oproti použitiu CWDM.[2][4][5]

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.



Obrázok 1.2: *Varianty hustého vlnového multiplexu*

2 Optické couplere

Výraz optický coupler pokrýva všetky zariadenia, ktoré združujú svetlo z viacerých zdrojov do jedného optického vlákna alebo rozdeľujú žiarenie z jedného alebo viacerých optických vstupov do viacerých odbočiek. Pomer počtu vstupov k počtu výstupov nazývame rozbočovací pomer, označujeme ho NxM a typický rozsah pre tento počet je od 1 po 64, poprípade môže byť aj viac. Počet výstupov býva klasicky mocninou dva, avšak existujú aj couplere ktoré majú tri alebo šesť výstupov. Optické vláknové couplere rozdeľujeme podľa viacerých aspektov, či už je to použitie zdroju napájania, podľa výrobného procesu alebo podľa rozbočovacieho pomeru.[6][7]

2.1 Rozdelenie couplerov

2.1.1 Couplere podľa zdroju napájania

- **Aktívne couplere**

Aktívne couplere optický signál príjmu a potom používajú kombináciu optických detektorov, opticko-elektrických konvertorov a zdroju žiarenia pre ďalší prenos. Pre tento proces potrebujú pre svoju činnosť zdroj napájania, čím sa stávajú aktívnymi prvkami siete.

- **Pasívne couplere**

Pasívneho couplere sú jednoduché optické komponenty, ktoré rozdeľujú signál bez opticko-elektrickej konverzie s nulovými požiadavkami na napájací zdroj, preto je tento typ najviac populárny.

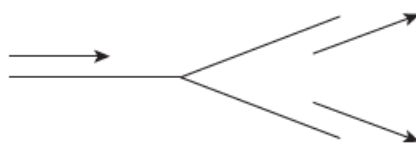
2.1.2 Couplere podľa výrobného procesu

Optické couplere podľa výrobného procesu môžeme rozdeliť do dvoch hlavných metód. V jednej sa couplere vyrábajú pomocou zváraní dvojíc vlákien pri vysokej teplote, ide o výrobnú metódu FBT (Fused Biconic Taper). V druhej metóde, ktorá sa označuje PLC (Planar Lightwave Circuit) a je modernejšia ako FBT, sa couplere vyrábajú pomocou sklenených doštičiek, do ktorých sú pomocou litografických metód vytvorené požadované štruktúry couplerov. Obidvom týmto výrobným metódam sa budeme bližšie venovať ešte v ďalších kapitolách.[2]

2.1.3 Couplere podľa rozbočovacieho pomeru

- **Optický rozbočovač (splitter)**

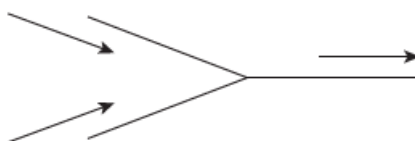
Jedná sa o pasívny typ optického coupleru, ktorý má 1 vstup a 2 výstupy, znázornenie môžeme vidieť na obrázku 2.1. Hlavnou úlohou je rozdelenie vstupného optického signálu do jednotlivých výstupov podľa deliaceho pomeru, ktorý je zvolený pri výrobe. Podľa deliaceho pomeru rozdeľujeme rozbočovače na symetrické a asymetrické. Symetrické rozbočovače majú na výstupoch rovnaký optický výkon, môžeme teda povedať že deliaci pomer je 50:50 pre rozbočovač 1:2. Asymetrické rozbočovače majú na výstupoch rôzne hodnoty optického výkonu ako 10:90, 1:99 a podobne. Keďže chceme najčastejšie priviesť do každého výstupu rovnaký optický výkon, najčastejšie sa používajú symetrické rozbočovače.[2][8]



Obrázok 2.1: Rozbočovač 1:2

- **Optický zlučovač (combiner)**

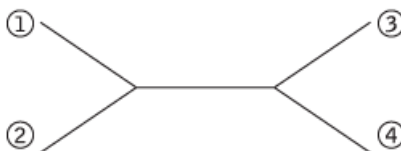
Optické zlučovače sú typy pasívnych couplerov, ktoré pracujú opačne ako optické rozbočovače. Kombinujú výkon z 2 a viacerých vstupov do jedného výstupu, znázornenie trojportového zlučovača môžeme vidieť na obrázku 2.2.



Obrázok 2.2: 3-portový zlučovač

- **X couplere**

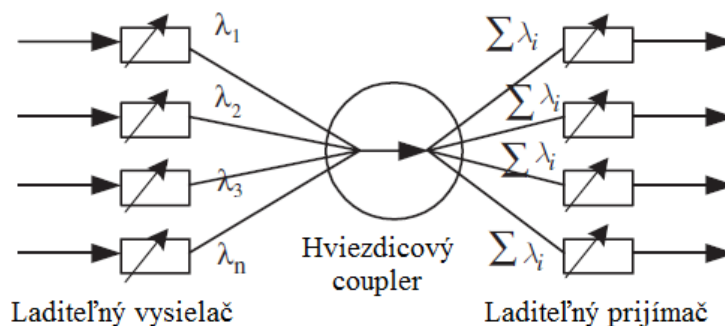
Tento druh pasívnych couplerov je kombináciou optického rozbočovača (splitter) a optického zlučovača (combiner). Vďaka tomu kombinuje signál z dvoch optických zdrojov a neskôr daný kombinovaný signál opäť rozdelí medzi 2 výstupy, ako môžeme vidieť na obrázku 2.3. Môžeme teda povedať, že iné pomenovanie pre X coupler je coupler 2:2. [8]



Obrázok 2.3: X coupler

- **Hviezdicové couplery**

Hviezdicové couplere sú pasívne zariadenia, v ktorom je každý uzol pripojený do hviezdicového coupleru a všetky prichádzajúce signály sú zmiešané a kombinované do jedného vlákna. Výsledný signál je potom opäť rozdelený na 1/n častí kombinovaného signálu a je smerovaný do prijímacích uzlov. Tento proces môžeme vidieť znázornený na obrázku 2.4.[9]



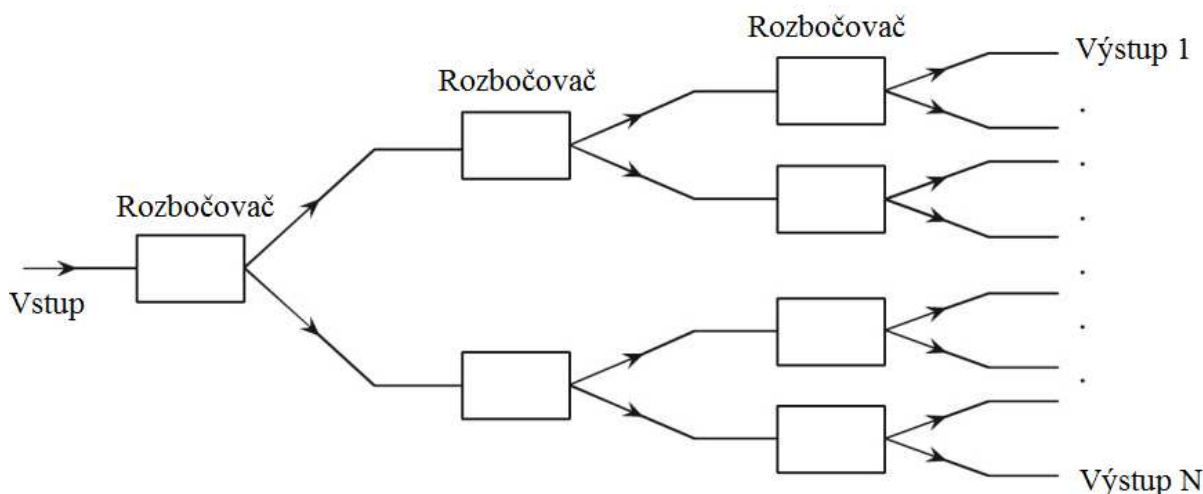
Obrázok 2.4: Hviezdicový coupler

Komunikácia medzi zdrojovým a cieľovým uzlom prechádza jedným z nasledujúcich módov:

- Single-hop - komunikácia je priamo medzi dvoma uzlami
- Multi-hop - informácia zo zdroja do cieľa môže byť smerovaná cez prechodný uzol siete

- ***Stromové couplere***

Stromové couplery sú pasívne zariadenia, ktoré môžu mať dve základné vyhotovenia. V jednom vyhotovení sa optický signál, ktorý prichádza do coupleru z jedného optického zdroja, rozdeľuje medzi viacero zariadení, počet výstupov musí byť väčší ako dva inak by sa jednalo o optický rozbočovač. Tento druh býva tiež realizovaný ako kombinované zapojenie optických rozbočovačov aby sme na výstupoch dostali požadovaný výkon. Takéto zapojenie si môžeme pozrieť na obrázku 2.5. Alebo môže stromový coupler pracovať opačne, teda výsledný signál je kombinovaný z viacerých zdrojov optických signálov do jedného výstupu. Tu musí taktiež platiť, že počet vstupov musí byť viac ako dva, inak by sme hovorili o optickom zlučovači. [8]



Obrázok 2.5: *Stromový coupler realizovaný pomocou optických rozbočovačov*

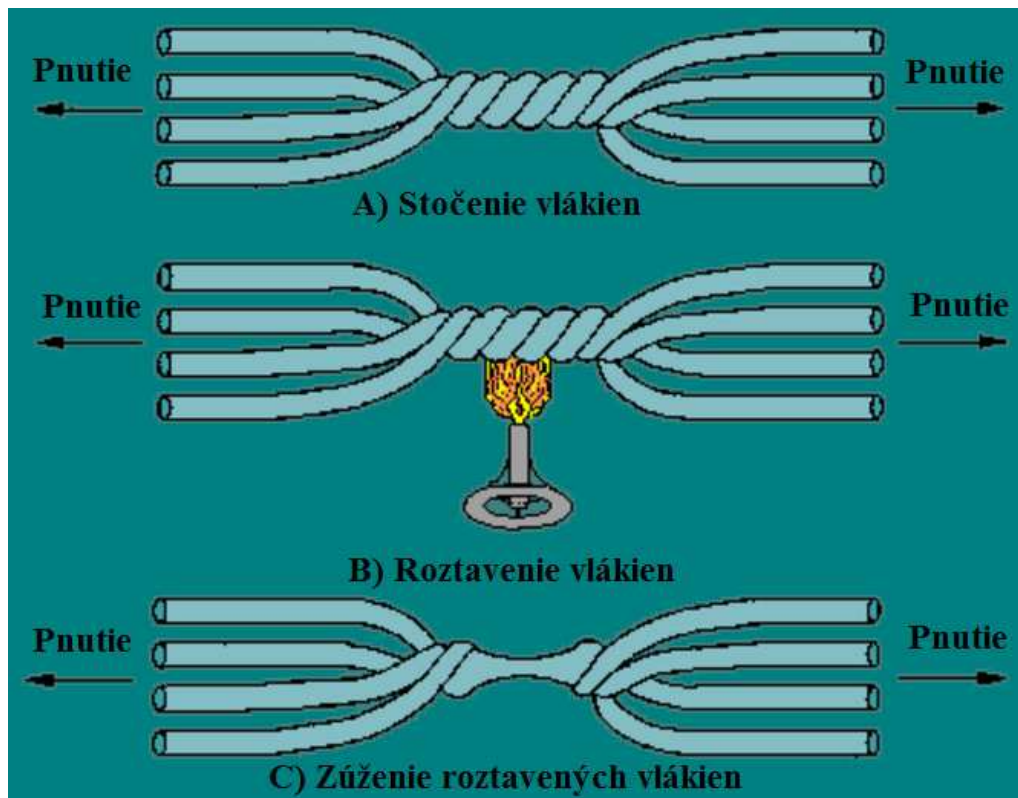
2.2 FBT (Fused Biconic Taper) couplere

2.2.1 Výrobný proces

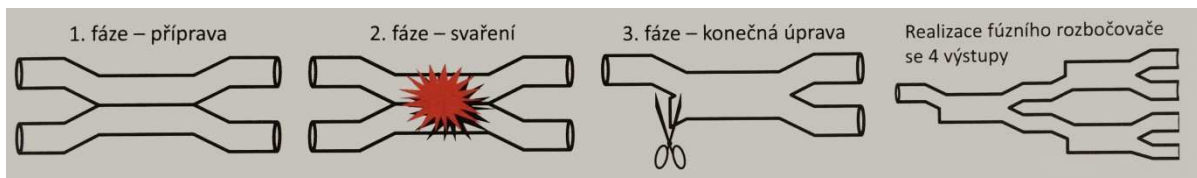
Staršia výrobná metóda pomocou, ktorej vyrábame fúzne rozbočovače. Táto metóda je založená na zváraní pri vysokej teplote, dvoch a viacerých vlákien. Ako prvé sa z vlákien odstránia všetky ochrany a čiastočne aj plášť. Vlákna sa následne skrútiť a vhodne sa zatavia. Tento proces je príkladne znázornený na obrázku 2.6. Výroba rozbočovača s jedným vstupom a viacerými požadovanými výstupmi sa realizuje pomocou kaskádového zapojenia niekoľkých základných Y-článkov. Tento spôsob je však veľmi citlivý na presnosť, pretože dĺžka zvaru ovplyvňuje deliaci

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

pomer, teda pomer výkonu, ktorý pôjde do jednotlivých výstupov. Tento proces môžeme vidieť na obrázku 2.7.[2]



Obrázok 2.6: Výroba optického coupleru metódou FBT



Obrázok 2.7: Optický coupler realizovaný kaskádovým zapojením

2.2.2 Typy FBT couplerov

- **Štandardný typ**

Tento typ couplerov má minimálny nárast strát a dlhodobú stabilitu. Nepoužité porty sú ukončené kvôli zmenšeniu spätnej reflexie. Tým, že dosahujú veľmi nízke polarizačno-závislé straty (PDL), ktoré sú menšie ako 0,04 dB pre deliaci pomer 50:50, používajú sa tieto typy tam kde je PDL v systémoch kritické.[10]

- **Širokopásmový typ**

Už názov tohto typu nám prezradza, že sa jedná o couplere, ktoré majú veľkú šírku pásma. Ďalej sa vyznačuje minimálnymi stratami, dlhou stabilitou a vysokou smerovosťou. Tieto couplere sú dostupné vo variantách s rôznym deliacim pomerom a sú optimalizované na vlnové dĺžky 1310 nm, 1550 nm alebo na vlnové dĺžky WDM technológie, čím teda pokrýva vlnové dĺžky od 1260 nm

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

do 1620 nm. Pre WDM aplikácie sa používajú dvoj-smerové širokopásmové couplere. Ich výhodou je, že ako stavebné bloky vo WDM sú cenovo výhodné a dovoľujú rozdeľovanie viacnásobného signálu, ktorý je prenášaný cez CWDM pomocou jedného modulu do viacerých trás. [10]

- **Typ dvojitého okna**

Tento typ couplerov sa vyznačuje tým, že používa už len vlnové dĺžky 1310 nm a 1550 nm, pre ktoré sú optimalizované a nie určitý rozsah ako to je pri širokopásmových typoch. Tieto couplere majú minimálne straty, dlhú stabilitu, vysokú presnosť a sú dostupné s deliacim pomerom vo viacerých variantách.[10]

2.2.3 Výhody

- Suroviny na výrobu sú veľmi lacné čím sa dosahuje nízka cena najmä pri nízko-kanálových rozdeľovačoch
- Deliaci pomer môže byť meraný v skutočnom čase
- Môže byť vyrobený rozdeľovač s nerovnomerným deliacim pomerom [11]

2.2.4 Nevýhody

- Pri používaní viacerých vlnových dĺžok (triple play) citlivé na stratu svetla
- Slabá konštantnosť výkonu, pri rozdeľovačoch 1x8 a väčších nemôžeme zabezpečiť rovnakú spektroskopiu čo ovplyvňuje prenosovú vzdialenosť
- Straty sa zväčšujú podľa teploty
- Vyrábajú sa väčšinou len s menším počtom výstupov, kvôli náročnému výrobnému procesu
- Pri veľkých rozdeľovačoch 1x16 a viac je zariadenie pomerne veľké a jeho spoľahlivosť je horšia [11]

2.3 PLC (Planar Lightwave Circuit) couplere

2.3.1 Výrobný proces

Tento typ výrobných metód je modernejší ako metóda FBT. Tento typ couplerov sa vyrába tak, že sú najskôr z kremičitého skla narezané doštičky. Po virtuálnom navrhnutí štruktúry masiek, sa na doštičky pomocou litografických metód tieto masky, ktoré zobrazujú požadovanú štruktúru vytvoria. Tieto doštičky sa následne ponoria do série špeciálnych roztokov s obsahom sodíka a striebra. Pri pôsobení tepla sa pomocou difúzie molekúl striebra a sodíka vytvorí jadro optického vlnovodu, pričom plášťom je samotná doštička. Je nutné ešte pripojiť k tejto doštičke vstupné a výstupné optické vlákna. Vyrobí sa preto vstupné a výstupné vláknové polia z rovnakého materiálu ako predchádzajúca štruktúra a do týchto doštičiek sa vyrežú V drážky, do ktorých sa s veľkou presnosťou vložia jadrá jednotlivých optických vlákien. Po vyrobení doštičiek s maskou, vstupnými a výstupnými vláknovými poľami, sa zatavia dohromady a vzniká optický coupler, ktorý sa pre lepšiu ochranu zataví ešte do pevného púzdra.

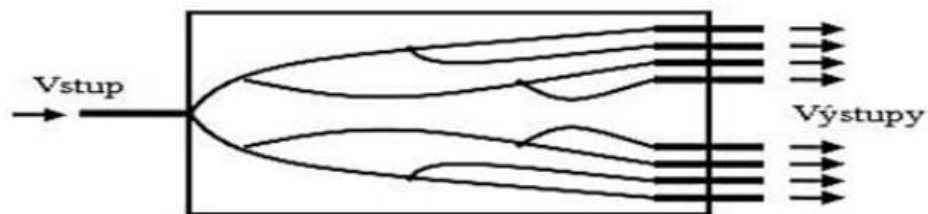
Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

2.3.2 Výhody

- Opatrebovanie na určitej prenosovej vlnovej dĺžke, nie je citlivé na prenos na ďalších vlnových dĺžkach
- Užívateľovi môže byť priradený spektrofotometrický signál
- Kompaktná štruktúra a malá veľkosť poskytuje inštalovanie priamo do rôzneho prevedenia boxov bez špeciálneho návrhu aby zaberali veľa miesta
- Jediné zariadenie môže poskytovať veľké množstvo kanálov [12]

2.3.3 Nevýhody

- Zložité výrobný proces
- Pomerne vysoká cena pri výrobe nízko-kanálových rozdeľovačov (splitroch) [12]



Obrázok 2.8: *PLC coupler*

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

3 Meranie

Couplere, ktoré boli použité pri meraní boli v rôznych vyhotoveniach deliaceho pomeru, aby sme zistili ako teplo pôsobí na couplere s rôznym deliacim pomerom, či sa tento pomer nejako zmení alebo zostane rovnaký. Konkrétne sme použili couplere s deliacim pomerom 10:90, 1:99 a 50:50. Aby sme predišli tomu, že sa budeme spoliehať len na couplere od určitého výrobcu, pri meraní boli použité couplere od dvoch rôznych výrobcov s rovnakým deliacim pomerom. Couplere od prvého výrobcu sú dodávané firmou Gezhi priamo z Číny, druhý výrobca je česká firma Optokon. Pri porovnaní couplerov okrem ceny, ktorá je pri firme Optokon niekoľko krát väčšia, vidíme na prvý pohľad, že couplere od dodávateľskej firmy Gezhi nie sú vyhotovené v takej vysokej kvalite ako od firmy Optokon, avšak na funkčnosti tým vôbec nestrácajú. Všetky merania, ktoré boli na týchto coupleroch vykonané boli v laboratóriu Vysokej školy báňskej - Technickej univerzity Ostrava. Na meranie som používal merací prístroj EXFO OLTS AXS-200/350, ktorý bol zdrojom optického žiarenia a zároveň bol aj detektorom. Ako prvé sa nameralo počiatočné meranie 21.9.2016 a po ňom, boli couplere vložené do trúby s teplotou, ktorá bola na začiatku kolísavá okolo teploty 95°C, a až neskôr sa ustálila na teplote 95°C. Ak to bolo možné meranie couplerov prebiehalo každý týždeň. Posledné spracované meranie sa uskutočnilo 28.3.2017.

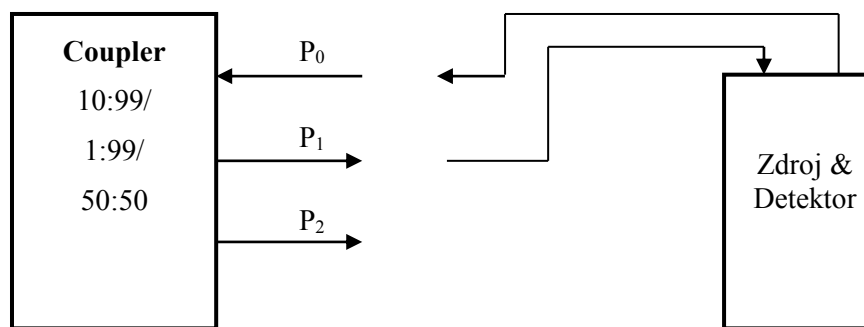
3.1 Meranie výkonu optických couplerov

Tento parameter je kľúčový pre moju prácu najmä pre výpočty vložného útlmu, deliaceho pomeru, celkových strát a homogenity strát. Týmto parametrom sa ešte budeme venovať v ďalších kapitolách. Pre dôležitosť nameraného výkonu, sa táto hodnota merala dvadsaťkrát pre minimalizovanie prípadných chýb pri meraní. Pri meraní bola používaná metóda 1C s tromi optickými vláknami. Prvé použité vlákno bolo použité na privedenie optického žiarenia na vstup optického coupleru P_0 , druhé vlákno bol samotný coupler a posledné vlákno bolo používané na privedenie výkonu z jednotlivých výstupov coupleru P_1 , P_2 na detektor. Toto zapojenie môžeme vidieť na obrázkoch 3.1 a 3.2. Meranie výkonu som vykonal v dvoch variantách a to ako počiatočné meranie a meranie s tepelným namáhaním. Pri každom z vykonaných meraní boli pred meraním optické vlákna vyčistené a čistota vlákna bola skontrolovaná mikroskopom.

3.1.1 Počiatočné meranie

Toto meranie bolo prvé z množstva merania, ktoré sa líšilo od ostatných tým, že meranie na daných optických coupleroch prebiehalo pri izbovej teplote aby sme výsledky z tohoto merania mohli porovnať s neskoršie nameranými výsledkami couplerov, ktoré vložíme do trúby a bude na ne pôsobiť tepelné namáhanie. Schému zapojenia počiatočného merania môžeme vidieť na obrázku 3.1.

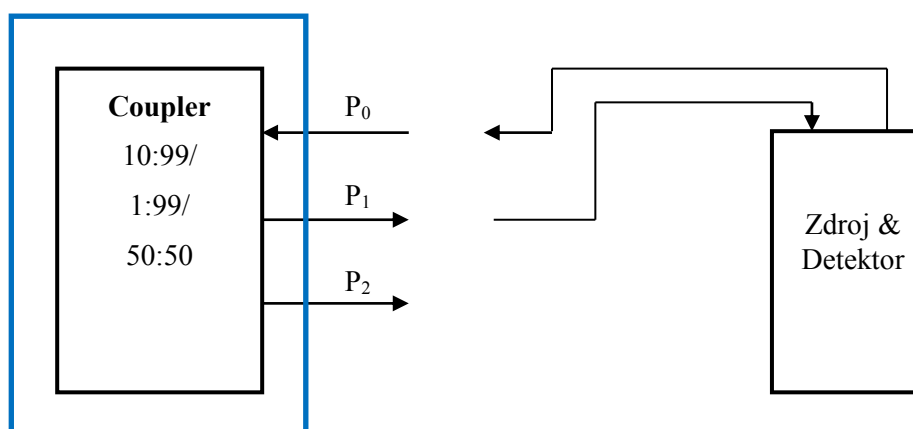
Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.



Obrázok 3.1: Schéma počiatočného merania

3.1.2 Meranie s tepelným namáhaním

Po nameraní počiatočného merania sme vložili optické couplere do trúby, ktorú sme nastavili na 95°C. Približne po dvoch týždňoch umiestnenia couplerov do tepelnej trúby som vykonal prvé meranie z mnohých meraní. Meranie couplerov prebiehalo každý týždeň ak to bolo možné. Schéma zapojenia merania výkonu s tepelným namáhaním je znázornená na obrázku 3.2.



Obrázok 3.2: Schéma merania výkonu s tepelným namáhaním

3.2 Vložný útlm

Je útlm, ktorý je spôsobený väzobnou oblasťou v optickom coupleri, nedokonalosťami geometrických parametrov ferúl pri vzájomnom kontakte. Pri mojom meraní tento útlm spôsobovali aj prívodné optické vlákna, pomocou ktorých som pripojil optický coupler k meraciemu prístroju, ktorý je zároveň zdrojom a detektorom. Vložný útlm je logaritmická bezrozmerná veličina, ktorá udáva pomer medzi výstupnou hodnotou výkonu, ktorý z coupleru vychádza v danom výstupe a vstupnou hodnotou výkonu, ktorý do coupleru dodávame. Čím je hodnota vložného útlmu menšia, tým lepšie. Vložný útlm udávame v jednotke decibel [dB], vzorec na výpočet môžeme vidieť v rovnici 3.1.[13] Praktické využitie rovnice 3.2 je zobrazené na príklade výpočtu z počiatočného merania

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

pre coupler Gezhi 10:90 medzi prvým výstupným vláknom, kde bol zmeraný výkon pre vlnovú dĺžku 1310 nm 205 μ W a vstupom, na ktorom bol pre vlnovú dĺžku 1310 nm nameraný výkon 2480 μ W.

$$-10 * \log \frac{P_1}{P_0} \quad (3.1)$$

$$-10 * \log \frac{0,000205}{0,002480} = 10,827 [dB] \quad (3.2)$$

3.3 Deliaci pomer

Jedná sa o vlastnosť coupleru v akom pomere dokáže výkon, ktorý mu dodávame na vstup, rozdeliť medzi výstupy. Tento pomer rozdelenia vstupného výkonu a teda aj parameter deliaceho pomeru sa udáva v percentách. Pri coupleroch s rozbočovacím pomerom 1:2 sa najčastejšie používa deliaci pomer 50:50, s ktorým som pri meraniach pracoval aj ja. Pri meraniach som použil aj couplere s iným deliacim pomerom a to 10:90 a 1:99. Hodnota deliaceho pomeru je udávaná výrobcom, no dá sa overiť pomocou nameraných výkonov na výstupoch podľa rovnice 3.3:

$$\frac{P_1}{P_1+P_2} * 100 \quad (3.3)$$

Z rovnice 3.3 môžeme vidieť, že ak chceme vypočítať deliaci pomer pre prvý výstup coupleru musíme jeho hodnotu vydeliť súčtom všetkých výstupov. Ak meriame výstupy na viacerých vlnových dĺžkach ako som to robil aj ja, musíme vždy dosadiť hodnoty, ktoré sme namerali pri rovnakej vlnovej dĺžke. Praktické znázornenie môžeme vidieť v rovnici 3.4, kde som dosadil hodnoty z počiatočného merania pre coupler Gezhi 10:90, pre výpočet deliaceho pomeru pre prvý výstup pri vlnovej dĺžke 1310 nm.

$$\frac{0,000205}{0,000205+0,002150} * 100 = 8,705 [\%] \quad (3.4)$$

3.4 Celkové straty

Je to parameter podobný vložnému útlmu s tým rozdielom, že vložný útlm udáva útlm pre daný výstup optického coupleru a celkové straty udávajú celkový útlm coupleru. Ideálne by mala byť táto hodnota nulová, no v skutočnosti sa táto hodnota nedá dosiahnuť, preto by sme sa mali vždy aspoň pokúsiť dosiahnuť čo najmenšiu hodnotu blížiacu sa k nule. Tieto straty sú udávané v decibeloch [dB] a vypočítame ich podľa vzorca 3.5. Praktické znázornenie použitia vzorca je v rovnici 3.6. Použité hodnoty sú z počiatočného merania pre coupler Gezhi 10:90 pre vlnovú dĺžku 1310 nm.

$$-10 \log \frac{P_1+P_2}{P_0} \quad (3.5)$$

$$-10 \log \frac{0,000205+0,002150}{0,002480} = 0,225 [dB] \quad (3.6)$$

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

3.5 Homogenita strát

Táto hodnota sa vypočíta ako rozdiel medzi maximálnym vložným útlmom a minimálnym vložným útlmom spomedzi všetkých výstupov daného coupleru. Ak máme už vypočítané hodnoty vloženého útlmu pre každý výstup coupleru, túto hodnotu už nie je ťažké dopočítať. Jednotkou homogenity strát je decibel [dB]. Dopocítanie homogenity strát je znázornené vo vzorci 3.7:

$$MAX_{vlož.útlm\ výstupu} - MIN_{vlož.útlm\ výstupu} \quad (3.7)$$

Keďže som používal couplere s rozbočovacím pomerom 1:2 maximálnu a minimálnu hodnotu získam veľmi rýchlo porovnaním dvoch hodnôt vložného útlmu pre každú vlnovú dĺžku zvlášť. Výpočet homogenity strát pre coupler Gezhi 10:90 pri požitej vlnovej dĺžke 1310 nm je znázornený v rovnici 3.8:

$$10,827 - 0,620 = 10,207 [dB] \quad (3.8)$$

3.6 Smerovosť

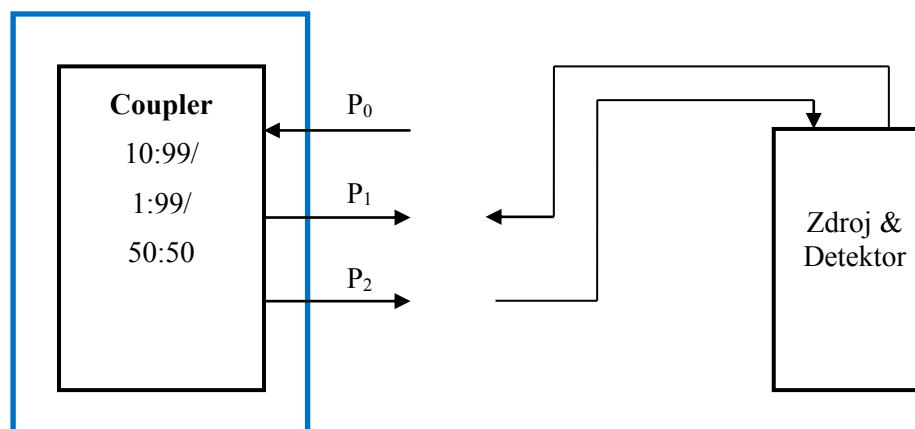
Alebo tiež aj útlm presluchu. Táto hodnota určuje aký veľký útlm je medzi jednotlivými výstupmi optického coupleru. Nameraný útlm by mal byť čo najväčší, pretože nechceme, aby nám výkon, ktorý smerujeme do určitého výstupu prechádzal aj do ďalších výstupov. Keďže požadujeme útlm jednotka smerovosti je decibel [dB]. Smerovosť sa meria pre každú kombináciu dvojice výstupov optického coupleru. Keďže pri mojom meraní boli použité couplere s rozbočovacím pomerom 1:2 smerovosť som meral len medzi dvoma výstupmi ako je to znázornené na obrázku 3.3. Hodnotu smerovosti vypočítame z nameraných výkonov medzi výstupmi podľa vzorca 3.9:

$$-10 \log \frac{P_{výstupu}}{P_{vstupu}} \quad (3.9)$$

Namerané hodnoty smerovosti boli v pikowattoch, no vstupný výkon bol v mikrowattoch. Je teda nutné ešte pred výpočtom previesť hodnoty tak aby boli namerané a vstupné hodnoty výkonu v rovnakých jednotkách. Vzorový výpočet môžeme vidieť v rovnici 3.10, do ktorej som dosadil hodnoty z počiatočného merania pre coupler Gezhi 10:90 pri meranej vlnovej dĺžke 1310 nm.

$$-10 \log \frac{0,000000000591}{0,002450} = 66,176 [dB] \quad (3.10)$$

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.



Obrázok 3.3: Schéma merania smerovosti

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4 Spracovanie nameraných hodnôt

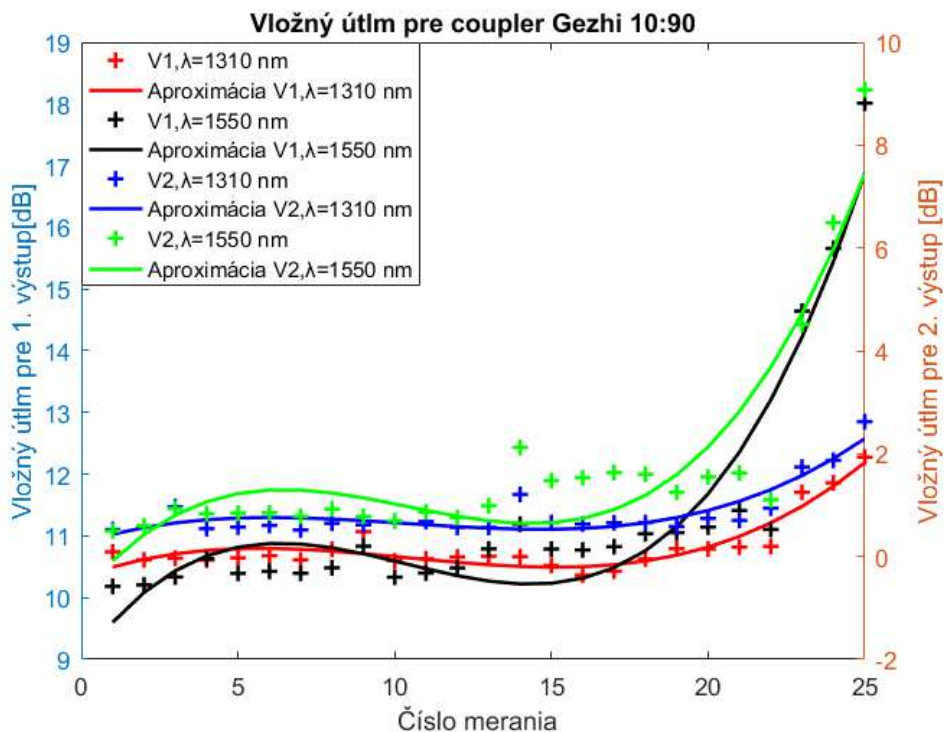
Dopočítané výsledky z nameraných hodnôt optických couplerov som spracoval v programe MATLAB do grafov po jednotlivých charakteristikách. Dopočítané hodnoty sú v grafoch zobrazené ako body, zobrazená krivka je aproximácia týchto bodov. Aproximáciu som spravil pomocou metódy najmenších štvorcov s polynómom tretieho stupňa. Z aproximačnej krivky som ďalej vypočítal koeficient determinácie R^2 , ktorý nám udáva hodnotu stupňa závislosti hodnôt aproximačnej krivky od skutočných hodnôt. Čím je hodnota bližšie k 1 tým je aproximácia presnejšia. Zdrojový kód na výpočet aproximácie a koeficientu determinácie môžeme vidieť nižšie. Hodnoty x predstavujú jednotlivé merania, hodnoty y sú dopočítané výsledky z nameraných hodnôt. Vysvetlenie jednotlivých funkcií nájdeme pod zdrojovým kódom.[14][15]

```
p = polyfit(x, y, 3)
aprox = polyval(p, x)
plot(x, y, 'r+', 'LineWidth', 1.5);
hold on;
z=linspace(min(x), max(x), 25);
y1=polyval(p, z);
plot(x, y1, 'r-', 'LineWidth', 1.5);
hold on
yresid = y-aprox;
SSresid = sum(yresid.^2);
SStotal = (length(y)-1)*var(y);
r2= 1 - SSresid/SStotal
```

- ***length(y)*** - dĺžka najväčšieho rozmeru poľa
- ***linspace(min(x), max(x), 25)*** - funkcia na vygenerovanie 25 bodov medzi minimálnou a maximálnou hodnotou x
- ***plot*** - funkcia na vykreslenie grafu
- ***polyfit(x, y, 3)*** - aproximácia dát polynómom tretieho stupňa
- ***polyval(p, x)*** - výpočet hodnoty polynómu
- ***sum*** - súčet prvkov poľa
- ***var(y)*** - vracia rozptyl prvkov pozdĺž prvého prvku poľa, ktorého veľkosť nie je 1 (odchýlka)

4.2 Gezhi 10:90

4.2.1 Vložný útlm



Obrázok 4.1: Graf vložného útlmu pre coupler Gezhi 10:90

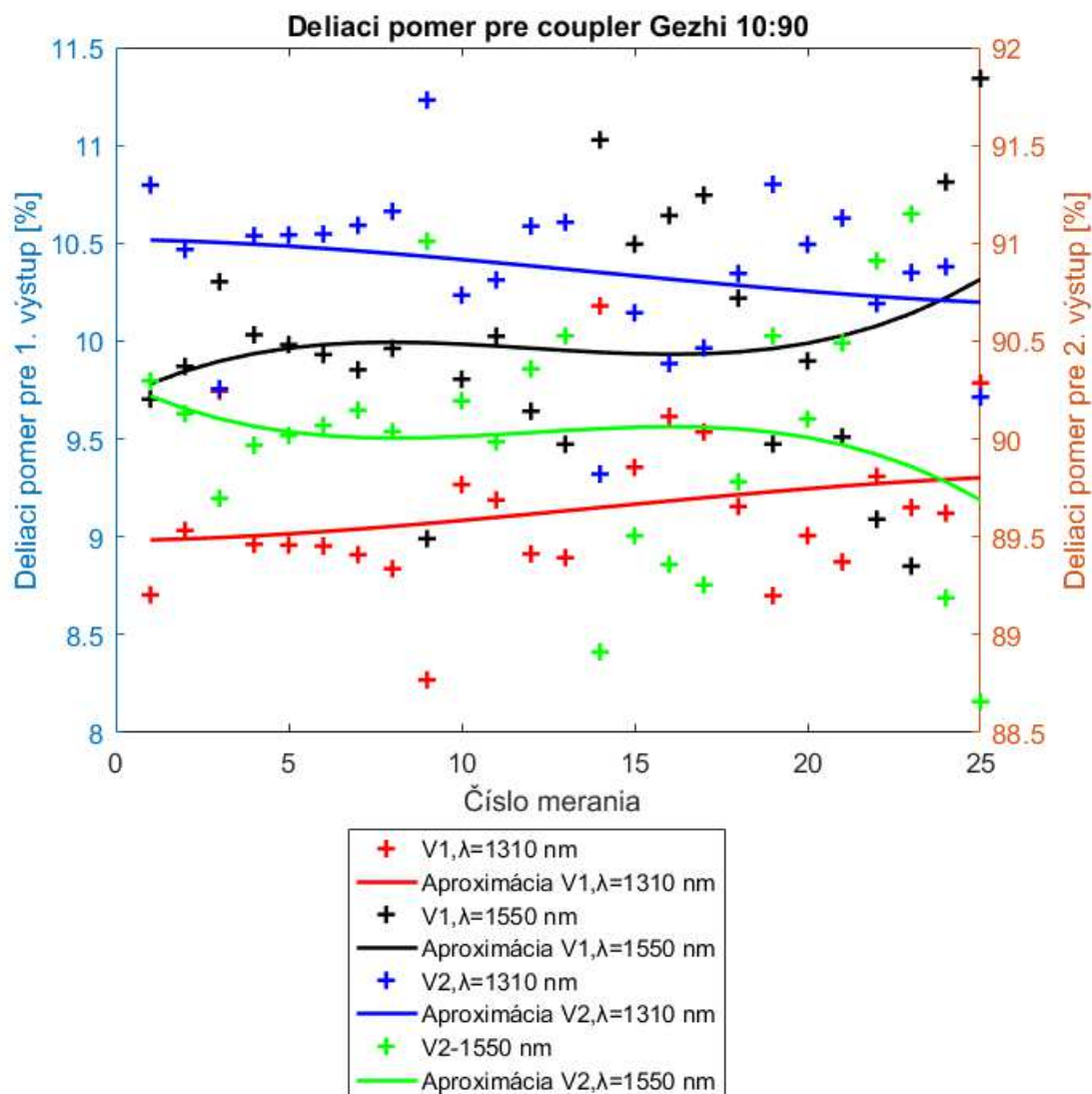
Z grafu môžeme vidieť, že počiatočný vložný útlm pre prvý výstup sa pohyboval pre obidve použité vlnové dĺžky v rozmedzí medzi hodnotami 10 a 11 dB. Môžeme si všimnúť, že vložný útlm pre prvý výstup postupne stúpala a klesala, nie však nejako výrazne. Zmena prišla po 16. meraniach, odkedy vložný útlm pre 1. výstup už len stúpala. Pre druhý výstup bol počiatočný vložný útlm pre vlnové dĺžky 1310 nm a 1550 nm takmer totožný, približne 11 dB. Prvé výraznejšie zmeny pre druhý výstup prišli až pri štrnástom meraní, kedy vložný útlm výrazne stúpol. Ďalšie merania potvrdili, že vložný útlm stúpol, nie však tak výrazne ako v 14. meraní. Výrazné zvýšenie prišlo v dvadsiatom treťom meraní, od ktorého vložný útlm postupne stúpala. Môžeme si všimnúť, že priebehy vložného útlmu s rovnakou vlnovou dĺžkou sú podobné. Hodnoty koeficientu determinácie vložného útlmu môžeme vidieť v tabuľke 4.1.

Tabuľka 4.1: Koeficient determinácie vložného útlmu pre coupler Gezhi 10:90

Výstup s λ	R^2
V1, $\lambda=1310$ nm	0,8740
V1, $\lambda=1550$ nm	0,8815
V2, $\lambda=1310$ nm	0,8052
V2, $\lambda=1550$ nm	0,8233

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.2.2 Deliaci pomer



Obrázok 4.2: Graf deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 10:90

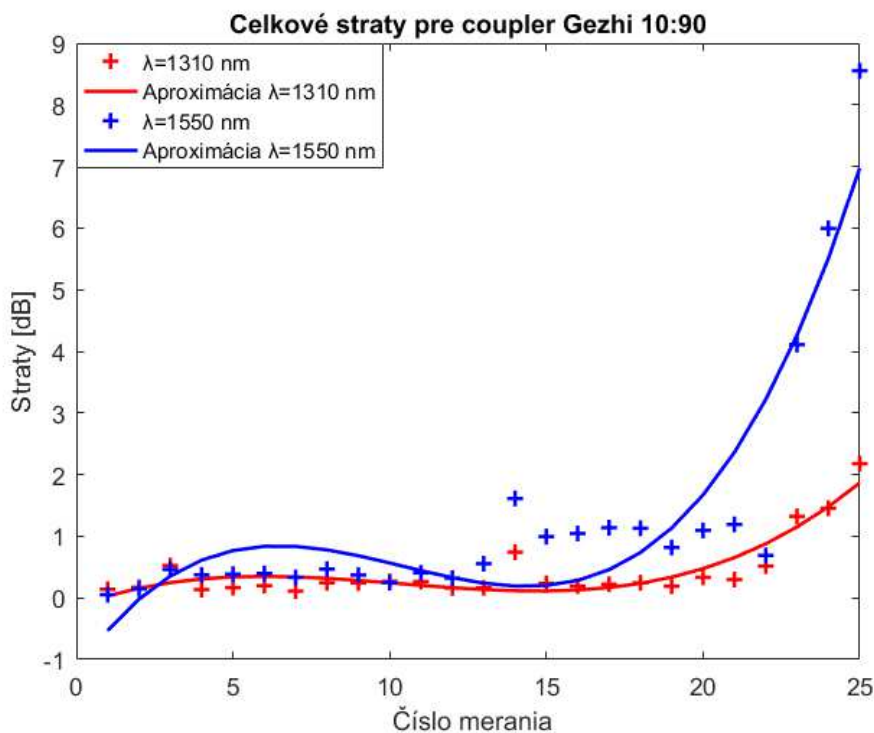
Z grafu vidíme, že počiatkové hodnoty deliaceho pomeru pre $\lambda = 1550$ nm sú bližšie k hodnotám aké určil výrobca, teda pre prvý výstup by to mala byť hodnota 10 % vstupného výkonu a pre druhý výstup 90 % vstupného výkonu. Deliaci pomer prvého výstupu postupne stúpal, čím prirodzene musela hodnota druhého výstupu postupne klesať. Tým, že sú hodnoty deliaceho pomeru vo veľkom rozmedzí, je aproximácia nepresná, čo môžeme vidieť v tabuľke koeficientu determinácie 4.2.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Tabuľka 4.2: *Koeficient determinácie deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 10:90*

Výstup s λ	R^2
V1, $\lambda=1310$ nm	0,0699
V1, $\lambda=1550$ nm	0,0310
V2, $\lambda=1310$ nm	0,0699
V2, $\lambda=1550$ nm	0,0300

4.2.3 Celkové straty



Obrázok 4.3: *Graf celkových strát pre coupler Gezhi 10:90*

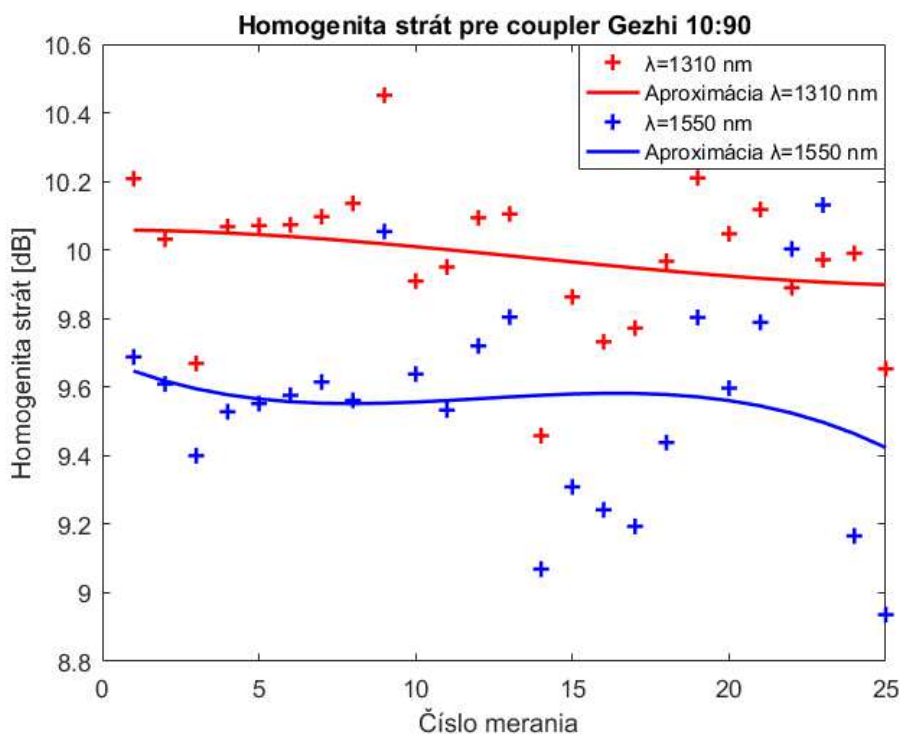
Môžeme si všimnúť, že celkové straty sa až do trinásteho merania pohybovali stále pod hodnotou 1 dB. Toto sa zmenilo až v štrnástom týždni, kedy hodnota výrazne stúpila. V nasledujúcich meraniach pre vlnovú dĺžku 1550 nm hodnota celkových strát mierne klesla oproti štrnástemu meraniu, avšak nie až tak aby bola v rozmedzí ako pri prvých trinástich meraniach. Hodnota celkových strát pre vlnovú dĺžku 1310 nm sa opäť vrátila na približne pôvodné hodnoty. Od dvadsiateho tretieho merania môžeme pozorovať výrazne rastúce celkové straty pre obidve vlnové dĺžky. Z hodnôt koeficientu determinácie v tabuľke 4.3 sa dozvieme, že hodnoty aproximačnej krivky sú veľmi podobné skutočným hodnotám.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Tabuľka 4.3: Koeficient determinácie celkových strát pre coupler Gezhi 10:90

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,8210
$\lambda=1550$ nm	0,8300

4.2.4 Homogenita strát



Obrázok 4.4: Graf homogenity strát pre coupler Gezhi 10:90

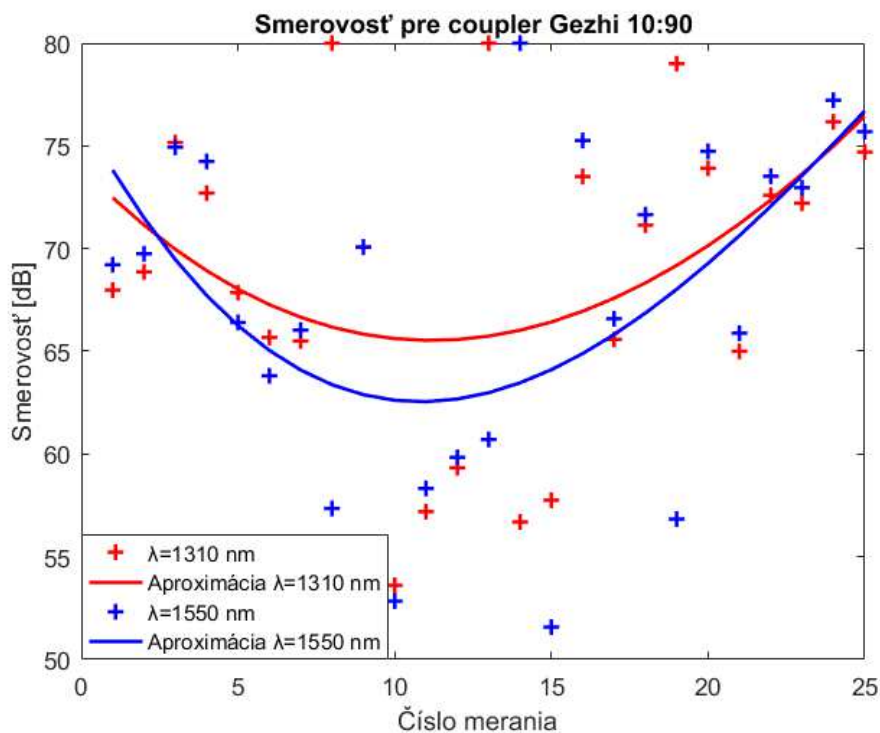
Zo zobrazených bodov v grafe môžeme vidieť, že počiatočná hodnota homogenity strát bola pre $\lambda = 1310$ nm 10,2 dB a pre $\lambda = 1550$ nm to bolo približne 9,7 dB. Hodnoty homogenity strát sa v priebehu merania skokovo menila, avšak ako môžeme vidieť podľa aproximačnej krivky, hodnota homogenity strát pri $\lambda = 1310$ nm postupne stále klesala. Pri $\lambda = 1550$ nm hodnota trochu klesla, potom sa ustálila a začala opäť klesať. Tabuľka 4.3 nám zobrazuje hodnoty koeficientu determinácie pre homogenitu strát.

Tabuľka 4.4: Koeficient determinácie homogenity strát pre coupler Gezhi 10:90

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,0697
$\lambda=1550$ nm	0,0227

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.2.5 Smerovosť



Obrázok 4.5: Graf smerovosti pre coupler Gezhi 10:90

Môžeme vidieť, že počiatkové hodnoty sú vysoké aby sa zamedzilo presluchu medzi jednotlivými výstupmi. Postupne s pôsobením tepla sa však tieto hodnoty zmenšovali a neskôr sa opäť zvyšovali, dokonca nad počiatkovú hodnotu. Z grafu môžeme vidieť niektoré hodnoty, ktoré dosahujú hodnotu 80 dB, sú to hodnoty, ktoré neboli namerané meracím prístrojom, ktorý je schopný merať do hodnoty približne 79 dB. V tabuľke 4.3 si môžeme pozrieť hodnoty koeficientu determinácie smerovosti coupleru.

Tabuľka 4.5: Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Gezhi 10:90

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,1798
$\lambda=1550$ nm	0,3020

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.2.6 Zhodnotenie, hodnoty aproximácie

Z grafov môžeme pozorovať, že vplyvom tepelného namáhania sa menia parametre coupleru Gezhi 10:90, niektoré viac a niektoré len mierne. Zmena vložného útlmu a celkových strát sa najviac prejavila pri posledných meraniach, kedy začali hodnoty prudko rásť. Pomer deliaceho pomeru sa začal vplyvom tepla mierne zmenšovať, avšak stále sa pohybuje pri pomere 10:90. Zmenšila sa aj homogenita strát, nie však nejako výrazne. Smerovosť sa nám najskôr zmenšila no neskôr dosiahla väčšiu hodnotu ako pri počiatočnom meraní. Môžeme teda povedať, že coupler ostal funkčný ale v praxi nepoužiteľný, kvôli nadobudnutým veľkým stratám, avšak v celkovom zhodnotení dopadol lepšie ako coupler Optokon 10:90. V tabuľke 4.6 môžeme vidieť hodnoty koeficientu aproximácie jednotlivých parametrov coupleru Gezhi 10:90.

Hodnoty aproximácie som dostal pomocou funkcie $polyval(p,x)$, ktorá sa dá zapísať ako rovnica 4.1. Hodnoty $p(1)$ až $p(4)$ som dostal pomocou funkcie $polyfit(x,z,3)$. Hodnota x predstavuje číslo merania, p je premenná, ktorá obsahuje $p(1)$, $p(2)$, $p(3)$ a $p(4)$ a z sú dopočítané hodnoty jednotlivých parametrov optického coupleru. Koeficienty aproximácie $p(1)$ až $p(4)$ nájdeme v tabuľke 4.6.

$$y = p(1) * x^3 + p(2) * x^2 + p(3) * x + p(4) \quad (4.1)$$

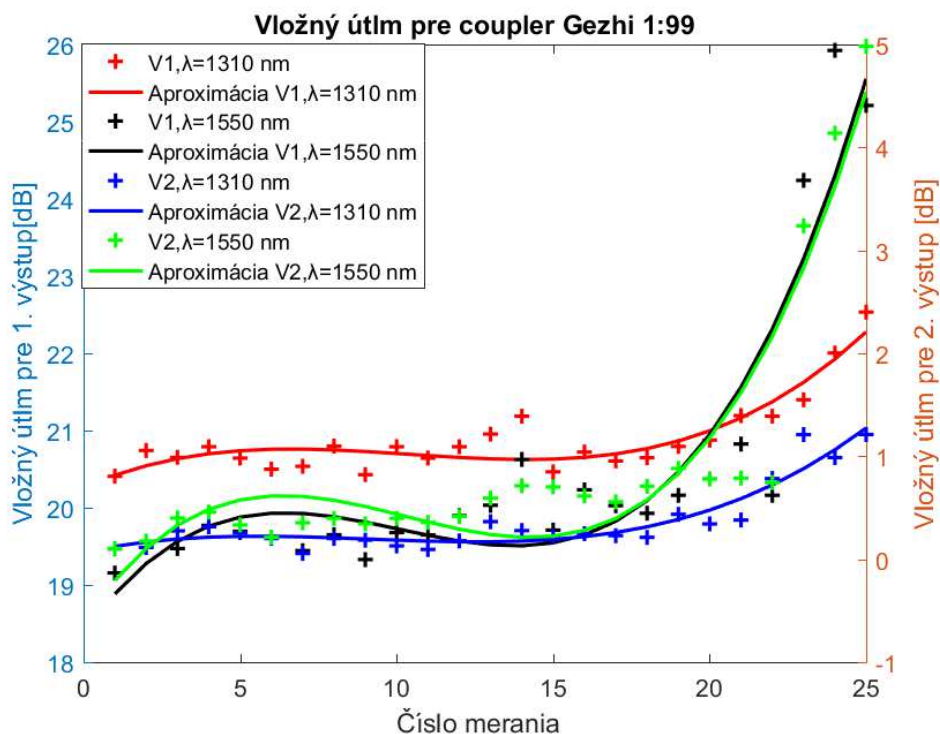
Tabuľka 4.6: Hodnoty koeficientu aproximácie pre coupler Gezhi 10:90

Aproximácia dát polynómom pre coupler Gezhi 10:90				
Parameter	p(1)	p(2)	p(3)	p(4)
Vložný útlm V1, $\lambda=1310$ nm	0,00073	-0,02273	0,18825	10,32992
Vložný útlm V1, $\lambda=1550$ nm	0,00259	-0,08037	0,70702	8,96946
Vložný útlm V2, $\lambda=1310$ nm	0,00071	-0,02216	0,18955	0,26549
Vložný útlm V2, $\lambda=1550$ nm	0,00268	-0,08362	0,74601	-0,75117
Deliaci pomer V1, $\lambda=1310$ nm	-0,00003	0,00105	0,00234	8,98045
Deliaci pomer V1, $\lambda=1550$ nm	0,00023	-0,00825	0,08784	9,70206
Deliaci pomer V2, $\lambda=1310$ nm	0,00003	-0,00105	-0,00234	91,01955
Deliaci pomer V2, $\lambda=1550$ nm	-0,00023	0,00816	-0,08772	90,29896
Celkové straty $\lambda=1310$ nm	0,00071	-0,02208	0,18770	-0,13656
Celkové straty $\lambda=1550$ nm	0,00266	-0,08322	0,74175	-1,19410
Homogenita strát $\lambda=1310$ nm	0,00002	-0,00069	0,00033	10,05811
Homogenita strát $\lambda=1550$ nm	-0,00010	0,00367	-0,03922	9,68230
Smerovosť $\lambda=1310$ nm	-0,00042	0,07699	-1,56292	73,96871
Smerovosť $\lambda=1550$ nm	-0,00192	0,16014	-2,79344	76,45529

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.3 Gezhi 1:99

4.3.1 Vložný útlm



Obrázok 4.6: Graf vložného útlmu pre coupler Gezhi 1:99

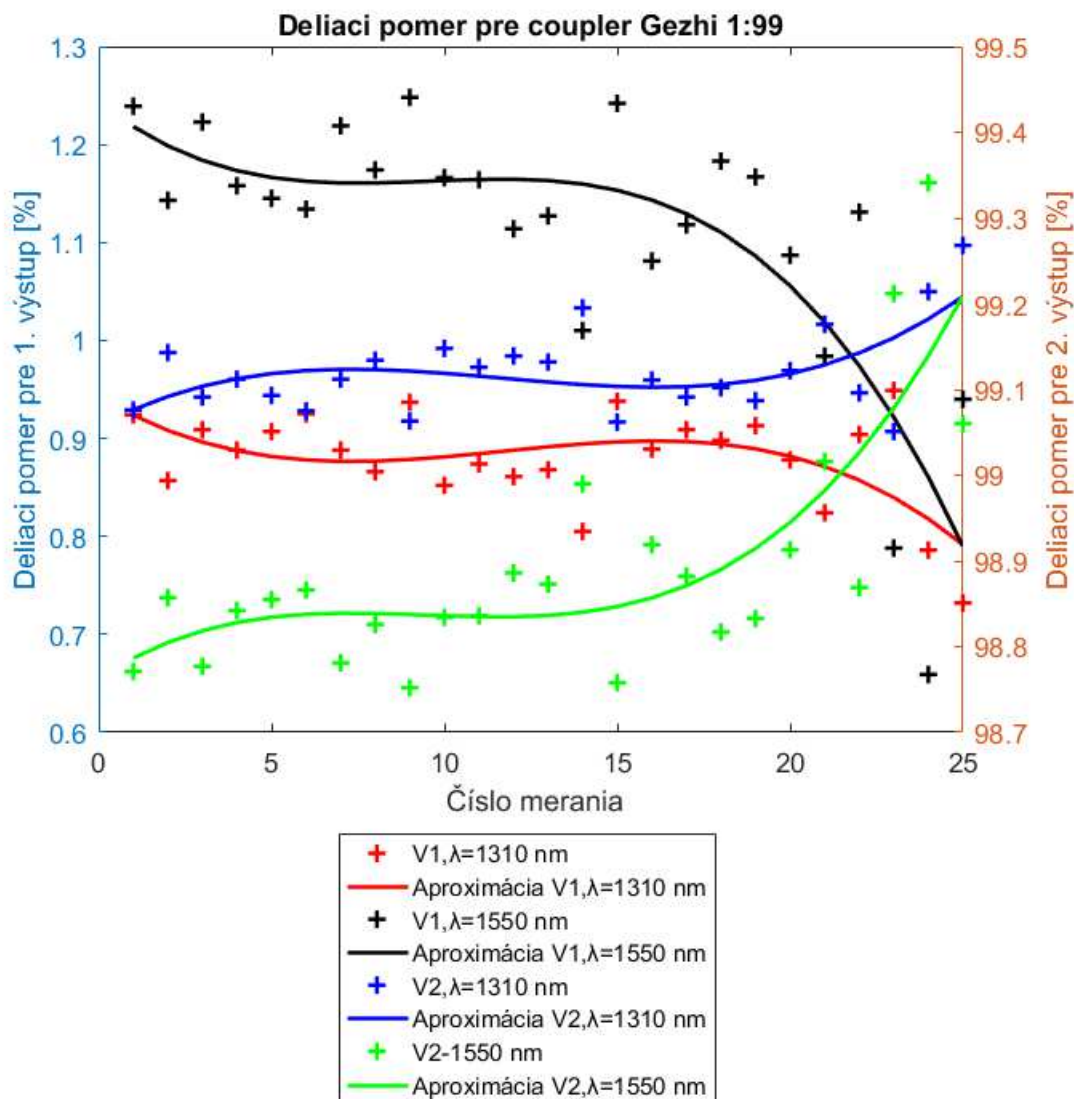
Z grafu si môžeme všimnúť, že namerané hodnoty počas meraní postupne stúpali, klesali a pri posledných meraniach výrazne stúpali. Aproximačné krivky vložného útlmu sa pre vlnovú dĺžku 1550 nm pohybovali takmer rovnako, podobne je to aj s aproximáciou hodnôt pre vlnovú dĺžku 1310 nm. Koeficient determinácie zobrazený v tabuľke 4.6 má celkom vysoké hodnoty čo značí, že namerané hodnoty sú veľmi podobné s hodnotami aproximačnej krivky.

Tabuľka 4.7: Koeficient determinácie vložného útlmu pre coupler Gezhi 1:99

Výstup s λ	R^2
V1, $\lambda=1310$ nm	0,8371
V1, $\lambda=1550$ nm	0,8430
V2, $\lambda=1310$ nm	0,8812
V2, $\lambda=1550$ nm	0,8725

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.3.2 Deliacci pomer



Obrázok 4.7: Graf deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 1:99

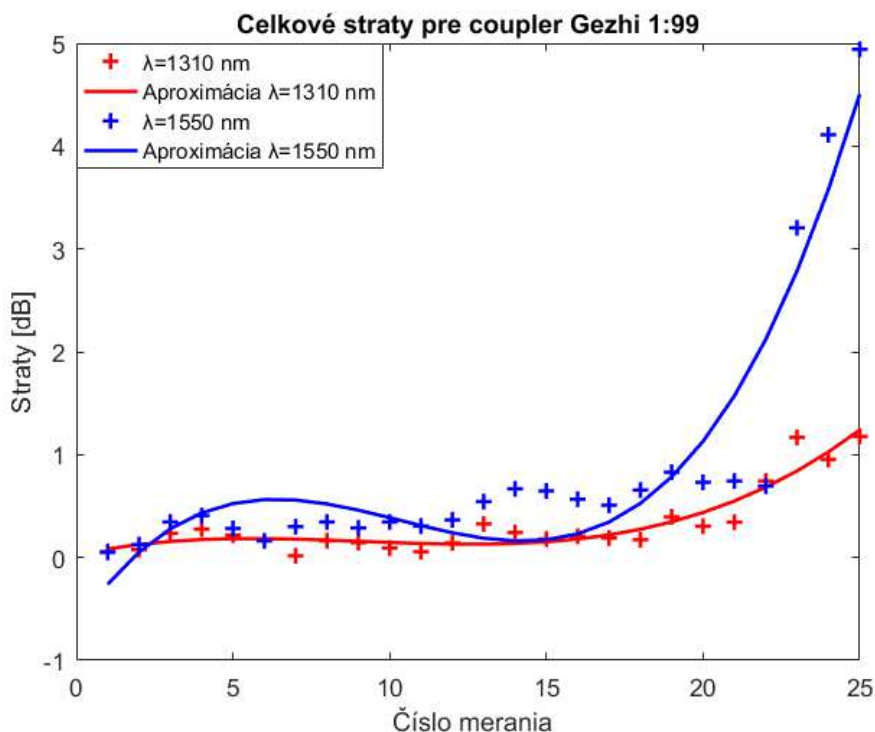
Na grafe si môžeme všimnúť meniace sa hodnoty deliaceho pomeru, kde výrazná zmena začala prichádzať až pri štrnástom meraní. Výraznejšia zmena pomeru vstupných výkonov medzi výstupy prichádzala približne od dvadsiateho merania. Z tabuľky 4.7 môžeme vidieť hodnoty koeficientu determinácie pre jednotlivé aproximácie výstupov.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Tabuľka 4.8: Koeficient determinácie deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 1:99

Výstup s λ	R^2
V1, $\lambda=1310$ nm	0,3007
V1, $\lambda=1550$ nm	0,6233
V2, $\lambda=1310$ nm	0,3007
V2, $\lambda=1550$ nm	0,6220

4.3.3 Celkové straty



Obrázok 4.8: Graf celkových strát pre coupler Gezhi 1:99

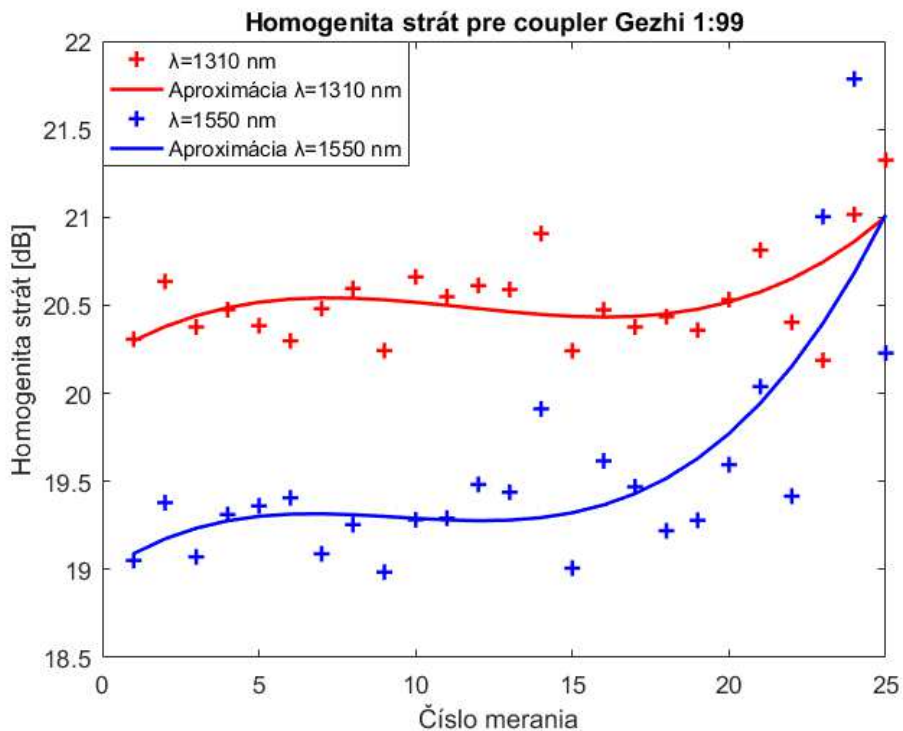
V grafe si môžeme všimnúť postupne zvyšujúce a znižujúce hodnoty pre vlnovú dĺžku 1550 nm, ktoré sa nakoniec podľa očakávanie už len zvyšovali. Hodnoty pre vlnovú dĺžku 1310 nm sa mierne zvyšovali no nemenili sa tak výrazne ako pri $\lambda = 1550$ nm. V tabuľke 4.8 si môžeme pozrieť vypočítaný koeficient determinácie pre jednotlivé aproximácie.

Tabuľka 4.9: Koeficient determinácie celkových strát pre coupler Gezhi 1:99

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,8836
$\lambda=1550$ nm	0,8726

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.3.4 Homogenita strát



Obrázok 4.9: Graf homogenity strát pre coupler Gezhi 1:99

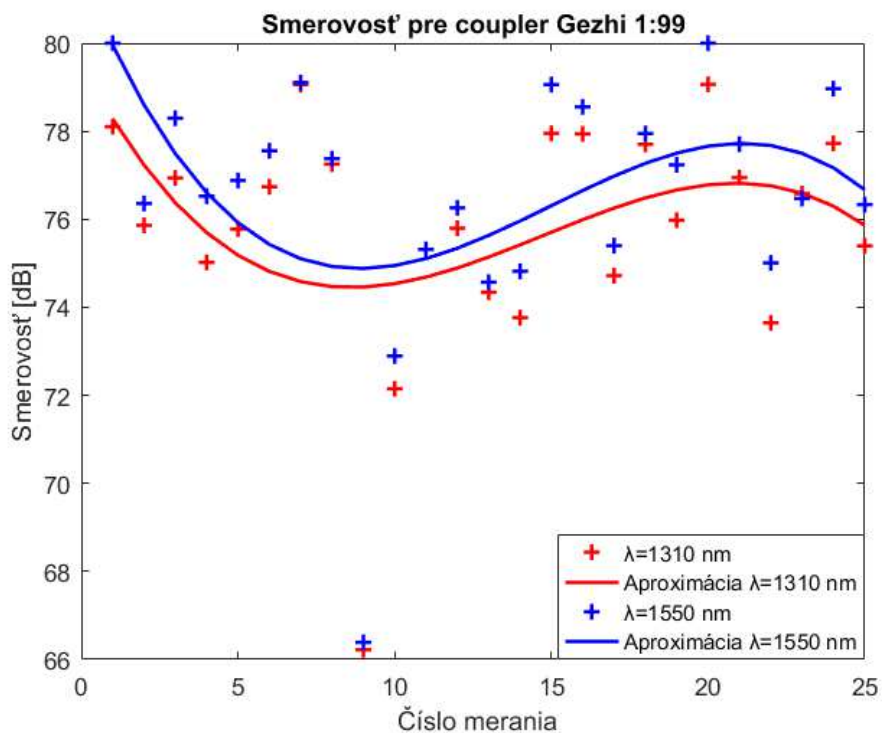
V grafe pre homogenitu strát, si môžeme všimnúť, že prvé výrazné zmeny sa ukázali v štrnástom meraní, odkedy začala homogenita strát pre vlnovú dĺžku 1550 nm postupne rásť. Pri vlnovej dĺžke 1310 nm začala homogenita výrazne rásť pri posledných meraniach.

Tabuľka 4.10: Koeficient determinácie homogenity strát pre coupler Gezhi 1:99

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,3245
$\lambda=1550$ nm	0,6098

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.3.5 Smerovosť



Obrázok 4.10: Graf smerovosti pre coupler Gezhi 1:99

V grafe si môžeme všimnúť takmer rovnaké aproximačné krivky, aj keď podľa tabuľky 4.5 tieto aproximácie nie sú veľmi totožné so skutočnými hodnotami, ktoré boli dopočítané z nameraných hodnôt. Hodnoty však boli vysoké čo je pri smerovosti žiadané.

Tabuľka 4.11: Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Gezhi 1:99

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,1461
$\lambda=1550$ nm	0,2172

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.3.6 Zhodnotenie, hodnoty aproximácie

Po uskutočnených meraniach môžeme vidieť ako pod vplyvom tepelného namáhania nám prudko vzrástli hodnoty vložného útlmu a celkových strát. Pri porovnaní kriviek týchto parametrov si môžeme všimnúť, že sú podobné ako má coupler Gezhi 10:90. Hodnoty deliaceho pomeru pre prvý výstup sa nám postupne blížila k nule, čím sa prirodzene zvyšuje hodnota pre druhý výstup. Homogenita strát postupne vzrastá nie však razantne ako celkové straty. Hodnoty smerovosti striedavo klesali aj stúpali no ku koncu už len klesali, hodnoty však stále dosahovali vysoký útlm, ktorý je pri smerovosti dôležitý. Môžeme teda zhodnotiť, že coupler stráca svoj deliaci pomer, prudko mu vzrastajú straty, čím sa stáva nevýhodný pre použitie, avšak oproti coupleru Optokon 1:99, ktorý bol zničený sú to dobré výsledky. V tabuľke 4.12 nájdeme hodnoty koeficientov aproximácie pre jednotlivé parametre coupleru Gezhi 1:99.

Hodnoty aproximácie som dostal pomocou funkcie $polyval(p,x)$, ktorá sa dá zapísať ako rovnica 4.2. Hodnoty $p(1)$ až $p(4)$ som dostal pomocou funkcie $polyfit(x,z,3)$. Hodnota x predstavuje číslo merania, p je premenná, ktorá obsahuje $p(1)$, $p(2)$, $p(3)$ a $p(4)$ a z sú dopočítané hodnoty jednotlivých parametrov optického coupleru. Koeficienty aproximácie $p(1)$ až $p(4)$ nájdeme v tabuľke 4.12.

$$y = p(1) * x^3 + p(2) * x^2 + p(3) * x + p(4) \quad (4.2)$$

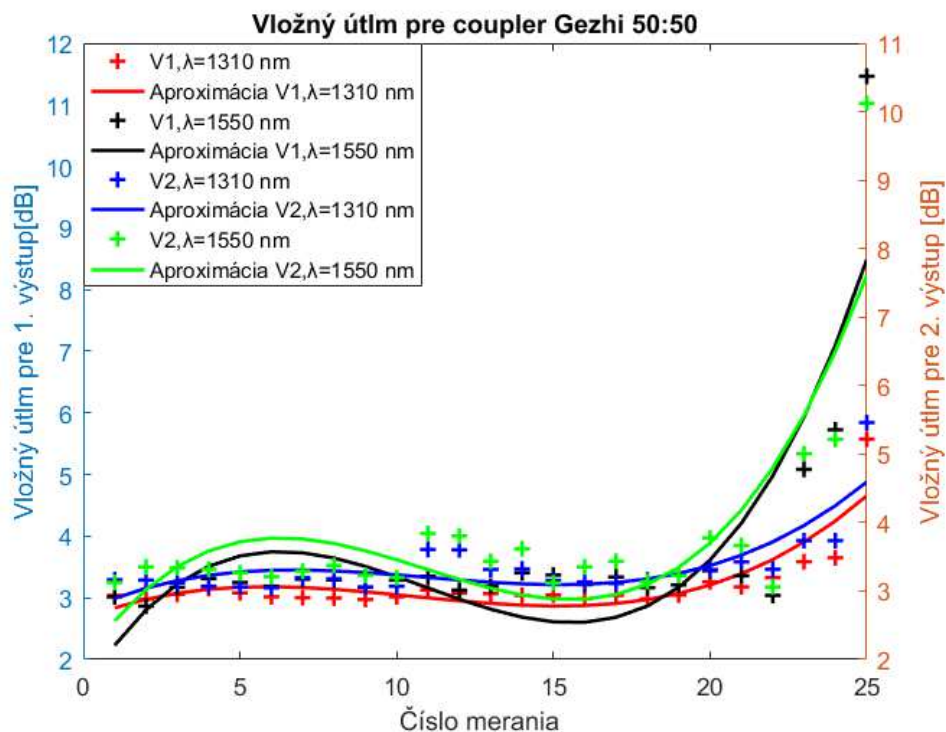
Tabuľka 4.12: Hodnoty koeficientu aproximácie pre coupler Gezhi 1:99

Aproximácia dát polynómom pre coupler Gezhi 1:99				
Parameter	p(1)	p(2)	p(3)	p(4)
Vložný útlm V1, $\lambda=1310$ nm	0,00064	-0,01981	0,17877	20,25997
Vložný útlm V1, $\lambda=1550$ nm	0,00216	-0,06552	0,57481	18,37141
Vložný útlm V2, $\lambda=1310$ nm	0,00031	-0,00853	0,06577	0,06664
Vložný útlm V2, $\lambda=1550$ nm	0,00166	-0,05136	0,45234	-0,60956
Deliaci pomer V1, $\lambda=1310$ nm	-0,00006	0,00214	-0,02150	0,94316
Deliaci pomer V1, $\lambda=1550$ nm	-0,00011	0,00309	-0,02821	1,24350
Deliaci pomer V2, $\lambda=1310$ nm	0,00006	-0,00214	0,02150	99,05684
Deliaci pomer V2, $\lambda=1550$ nm	0,00010	-0,00297	0,02650	98,76290
Celkové straty $\lambda=1310$ nm	0,00032	-0,00863	0,06687	0,02492
Celkové straty $\lambda=1550$ nm	0,00166	-0,05148	0,45336	-0,66317
Homogenita strát $\lambda=1310$ nm	0,00032	-0,01124	0,11229	20,19672
Homogenita strát $\lambda=1550$ nm	0,00050	-0,01416	0,12245	18,98092
Smerovosť $\lambda=1310$ nm	-0,00254	0,11258	-1,37272	79,54728
Smerovosť $\lambda=1550$ nm	-0,00312	0,14029	-1,75322	81,57078

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.4 Gezhi 50:50

4.4.1 Vložný útlm



Obrázok 4.11: Graf vložného útlmu pre coupler Gezhi 50:50

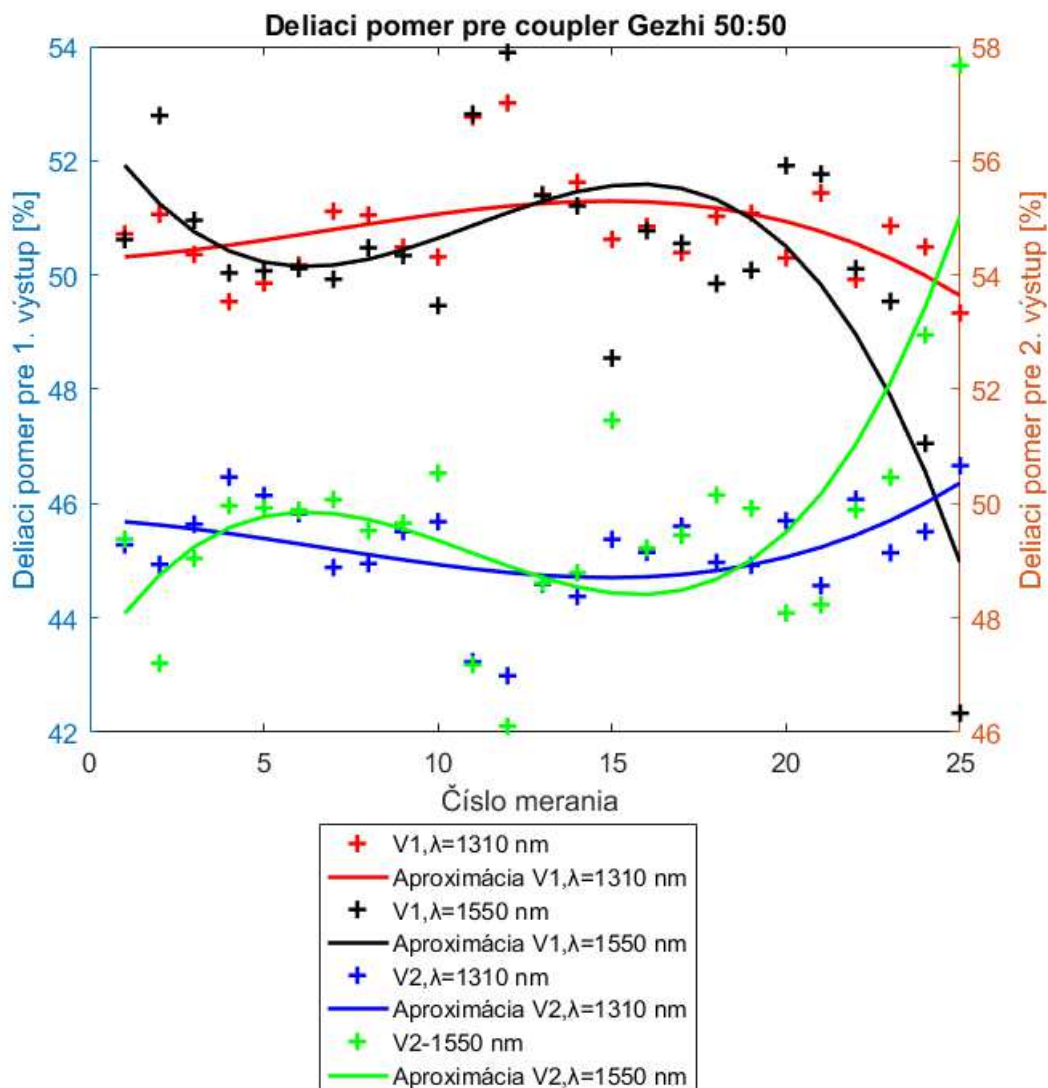
Z grafu vidíme, že aproximačné krivky, ktoré zobrazujú výstupy s rovnakou vlnovou dĺžkou majú približne rovnaký priebeh. Môžeme si všimnúť, že prvá výrazná zmena bola nameraná pri jedenástom meraní na druhom výstupe optického coupleru. Trvalo zvyšujúce sa hodnoty vložného útlmu môžeme pozorovať od dvadsiateho merania. Vzostup hodnôt je výraznejší pri vlnovej dĺžke 1550 nm ako pri vlnovej dĺžke 1310 nm.

Tabuľka 4.13: Koeficient determinácie vložného útlmu pre coupler Gezhi 50:50

Výstup s λ	R^2
V1, $\lambda=1310$ nm	0,7363
V1, $\lambda=1550$ nm	0,7237
V2, $\lambda=1310$ nm	0,6453
V2, $\lambda=1550$ nm	0,6928

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.4.2 Deliacci pomer



Obrázok 4.12: Graf deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 50:50

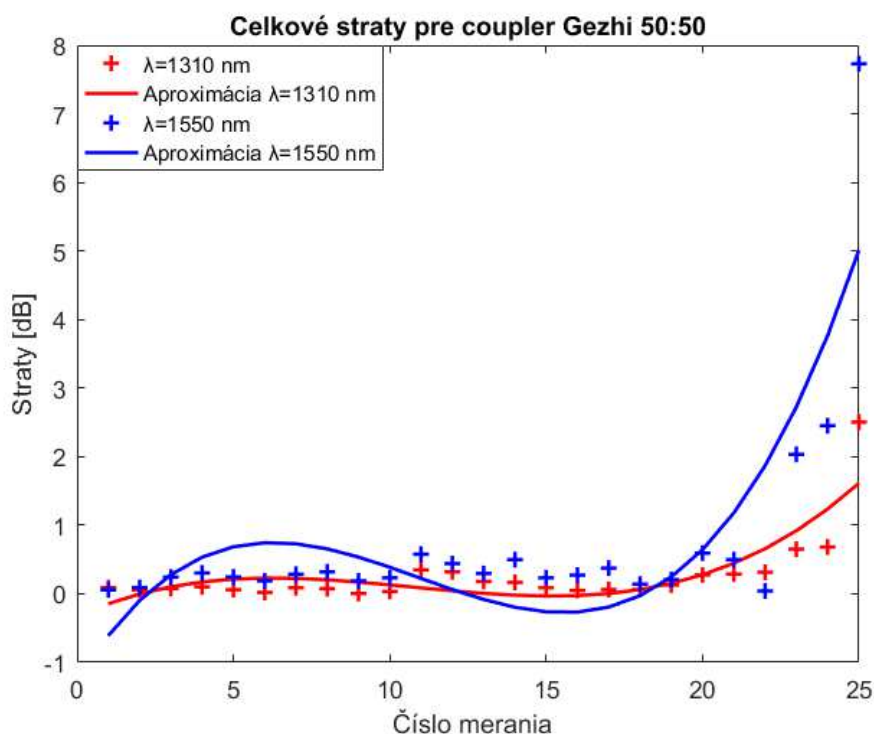
V grafe môžeme pozorovať, že počiatočné meranie dopadlo pri použití rôznych vlnových dĺžok pre každý výstup takmer rovnako. Z aproximácie si ale môžeme pozrieť, že priebeh pomeru výstupov k vstupnému výkonu sa výrazne líši podľa použitých vlnových dĺžok, kde vlnová dĺžka 1310 nm nemá taký výrazný priebeh ako vlnová dĺžka 1550 nm. Koeficient determinácie pre aproximáciu hodnôt je v tabuľke 4.7.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Tabuľka 4.14: *Koeficient determinácie deliaceho pomeru pre coupler Gezhi 50:50*

Výstup s λ	R^2
V1, $\lambda=1310$ nm	0,2708
V1, $\lambda=1550$ nm	0,5694
V2, $\lambda=1310$ nm	0,2708
V2, $\lambda=1550$ nm	0,5694

4.4.3 Celkové straty



Obrázok 4.13: *Graf celkových strát pre coupler Gezhi 50:50*

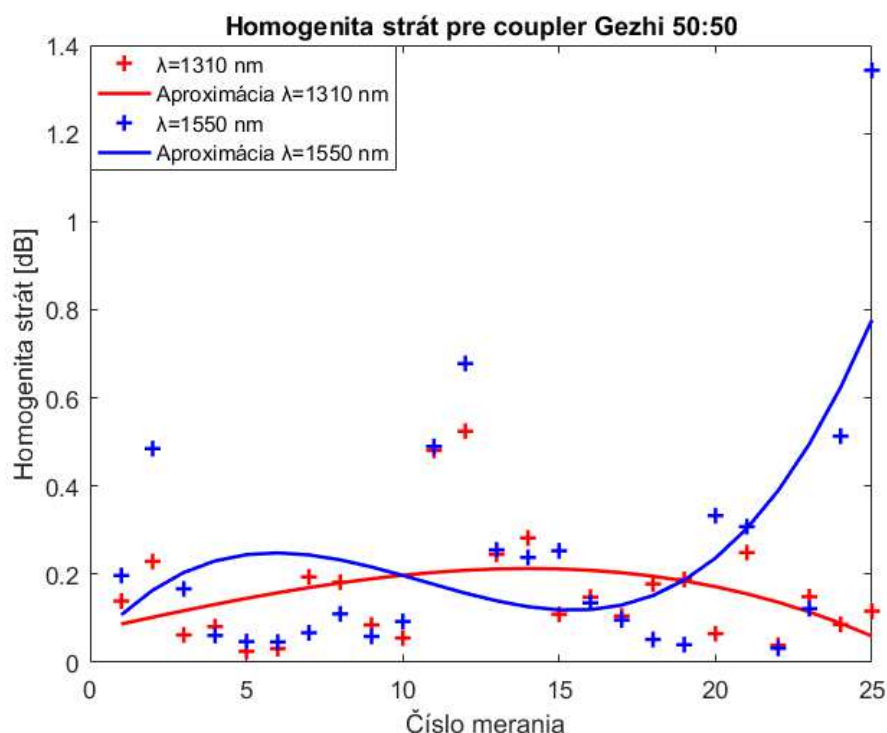
Z grafu vidíme, že hodnoty celkových strát sa výrazne nemenili do jedenásteho merania, kedy sa straty zvýšili pri oboch vlnových dĺžkach, avšak nie tak výrazne ako sa začali zvyšovať od dvadsiateho tretieho merania, kedy sa už hodnota strát neustálila ale stále sa zvyšovala. Koeficient determinácie pre aproximáciu celkových strát nájdeme v tabuľke 4.13.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Tabuľka 4.15: *Koeficient determinácie celkových strát pre coupler Gezhi 50:50*

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,7050
$\lambda=1550$ nm	0,7147

4.4.4 Homogenita strát



Obrázok 4.14: *Graf homogenity strát pre coupler Gezhi 50:50*

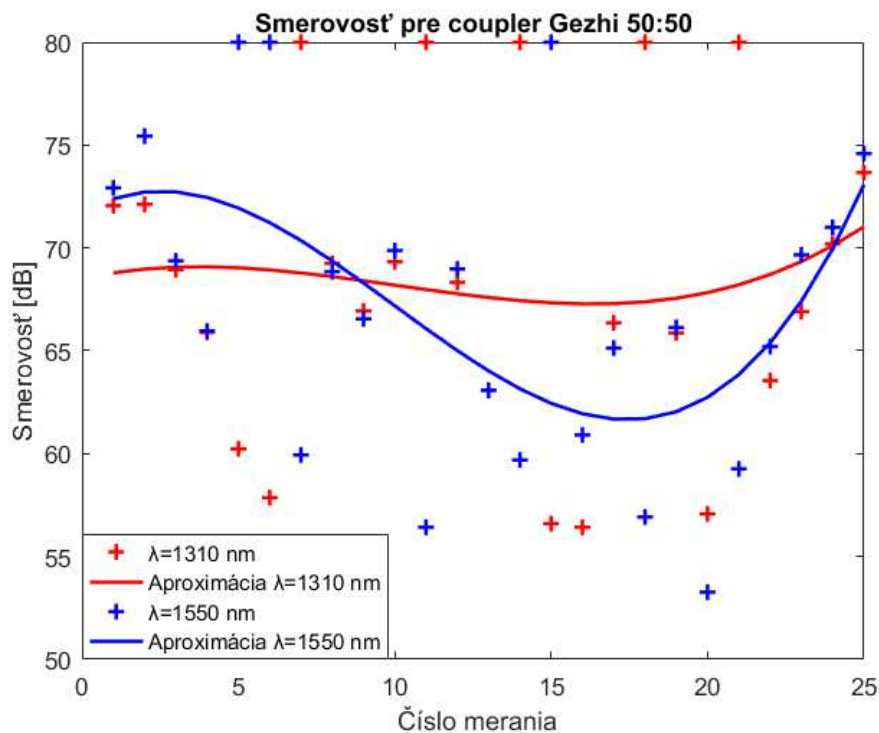
V grafe môžeme pozorovať, že homogenita strát pre vlnovú dĺžku 1310 nm spočiatku stúpala no neskôr začala opäť klesať. Pri vlnovej dĺžke 1550 nm hodnota mala podobný priebeh, teda stúpala a klesala, no pri posledných meraniach mala na rozdiel od vlnovej dĺžky 1310 nm, vzostupný priebeh. Z tabuľky 4.14 vidíme že aproximácia voči skutočným hodnotám nie je veľmi presná.

Tabuľka 4.16: *Koeficient determinácie homogenity strát pre coupler Gezhi 50:50*

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,1346
$\lambda=1550$ nm	0,3196

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.4.5 Smerovosť



Obrázok 4.15: Graf smerovosti pre coupler Gezhi 50:50

V grafe môžeme pozorovať pre vlnovú dĺžku 1550 nm výrazne klesajúcu krivku, ktorá neskôr opäť vzrastie takmer na rovnakú hodnotu akou bola hodnota pri počiatocnom meraní. Klesajúco stúpavú krivku má aj aproximácia pre vlnovú dĺžku 1310 nm, avšak nie tak výraznú ako aproximácia vlnovej dĺžky 1550 nm. Rovnako ako pri vlnovej dĺžke 1550 nm tak aj pri 1310 nm je prvá a posledná hodnota približne rovnaká. V grafe si môžeme všimnúť hodnoty 80 dB, tieto hodnoty som zvolil ja, pretože merací prístroj dokáže merať len do hodnoty 35 pW čo je v prepočte približne 79 dB. Z tabuľky 4.15 vidíme že aproximácia pre vlnovú dĺžku 1310 nm je veľmi zlá.

Tabuľka 4.17: Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Gezhi 50:50

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,0150
$\lambda=1550$ nm	0,3111

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.4.6 Zhodnotenie, hodnoty aproximácie

Opäť môžeme vidieť, že rovnako ako pri predchádzajúcich coupleroch sa nám hodnoty vložného útlmu a celkových strát prudko začali zvyšovať pri posledných meraniach. Pomer deliaceho pomeru sa výraznejšie zmenil pri vlnovej dĺžke 1550 nm, kedy posledné meranie už bolo v pomere približne 42:58. Pre vlnovú dĺžku 1310 nm sa pomer nejako výrazne nezmenil a stále ostal pri hodnotách 50:50. Homogenita strát sa pre vlnovú dĺžku 1310 nm takmer nezmenila, no pri vlnovej dĺžke 1550 nm začala pri posledných meraniach prudko rásť. Hodnoty smerovosti sa striedavo menili, no vždy boli nad hodnotou 50 dB čo je hodnota, ktorú by mala smerovosť presahovať. Coupler je aj po tepelnom namáhaní stále funkčný ale jeho parametre sa zhoršili najmä celkové straty, ktoré začali ku koncu prudko rásť. Pri porovnaní výsledkov s couplerom Optokon 50:50, vyšiel tento coupler horšie. Hodnoty koeficientov aproximácie pre jednotlivé parametre nájdeme v tabuľke 4.18.

Hodnoty aproximácie som dostal pomocou funkcie $polyval(p,x)$, ktorá sa dá zapísať ako rovnica 4.3. Hodnoty $p(1)$ až $p(4)$ som dostal pomocou funkcie $polyfit(x,z,3)$. Hodnota x predstavuje číslo merania, p je premenná, ktorá obsahuje $p(1)$, $p(2)$, $p(3)$ a $p(4)$ a z sú dopočítané hodnoty jednotlivých parametrov optického coupleru. Koeficienty aproximácie $p(1)$ až $p(4)$ nájdeme v tabuľke 4.18.

$$y = p(1) * x^3 + p(2) * x^2 + p(3) * x + p(4) \quad (4.3)$$

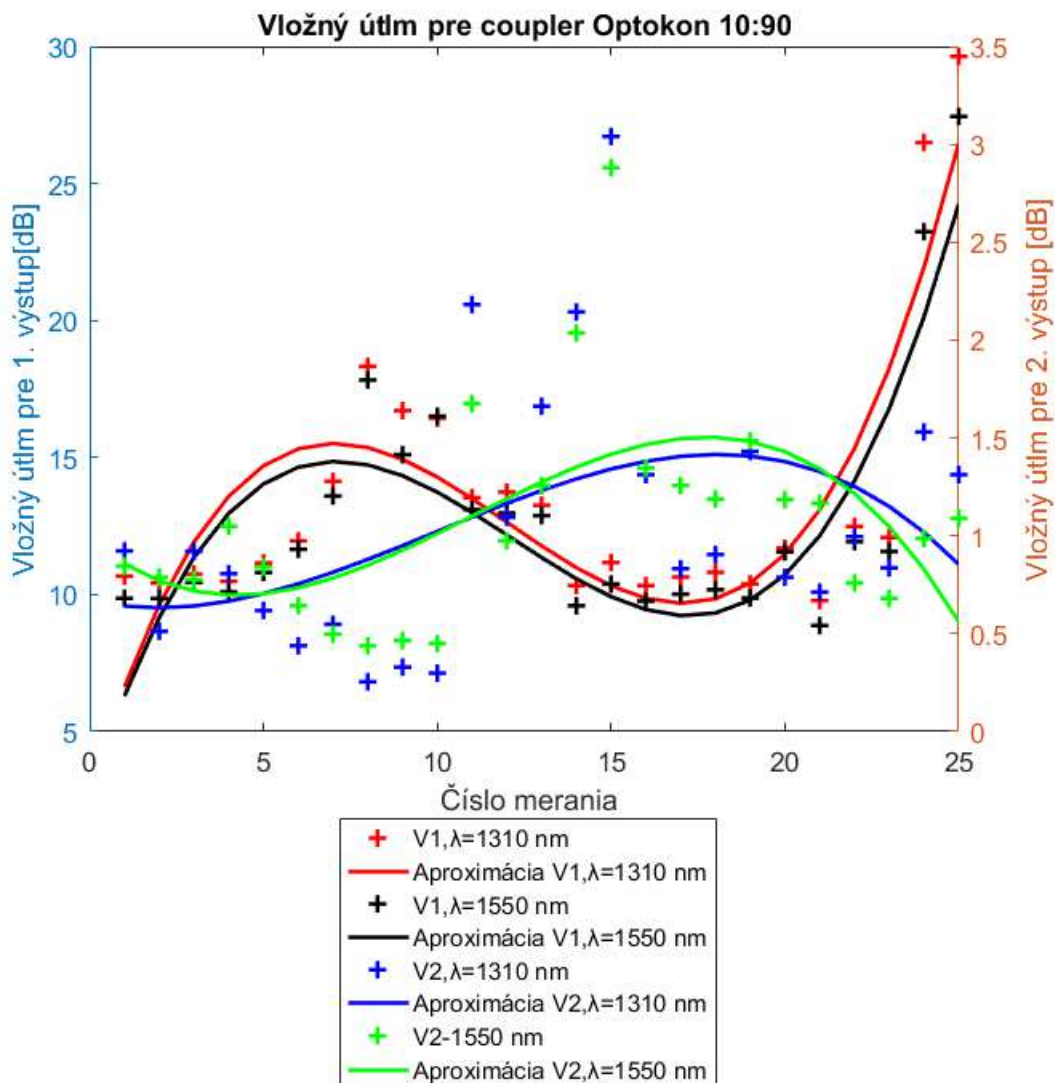
Tabuľka 4.18: Hodnoty koeficientu aproximácie pre coupler Gezhi 50:50

Aproximácia dát polynómom pre coupler Gezhi 50:50				
Parameter	p(1)	p(2)	p(3)	p(4)
Vložný útlm V1, $\lambda=1310$ nm	0,00078	-0,02448	0,20675	2,65386
Vložný útlm V1, $\lambda=1550$ nm	0,00285	-0,09331	0,83442	1,48554
Vložný útlm V2, $\lambda=1310$ nm	0,00069	-0,02281	0,21194	2,70238
Vložný útlm V2, $\lambda=1550$ nm	0,00227	-0,07418	0,66343	1,97339
Deliaci pomer V1, $\lambda=1310$ nm	-0,00047	0,00960	0,03022	50,27806
Deliaci pomer V1, $\lambda=1550$ nm	-0,00331	0,10941	-0,97787	52,79380
Deliaci pomer V2, $\lambda=1310$ nm	0,00047	-0,00960	-0,03022	49,72194
Deliaci pomer V2, $\lambda=1550$ nm	0,00331	-0,10941	0,97787	47,20620
Celkové straty $\lambda=1310$ nm	0,00074	-0,02363	0,20894	-0,33209
Celkové straty $\lambda=1550$ nm	0,00254	-0,08328	0,74473	-1,27477
Homogenita strát $\lambda=1310$ nm	-0,00002	-0,00009	0,01576	0,07142
Homogenita strát $\lambda=1550$ nm	0,00030	-0,00968	0,08293	0,03416
Smerovosť $\lambda=1310$ nm	0,00181	-0,05461	0,33286	68,50889
Smerovosť $\lambda=1550$ nm	0,00668	-0,20014	0,88108	71,70473

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.5 Optokon 10:90

4.5.1 Vložný útlm



Obrázok 4.16: Graf vložného útlmu pre coupler Optokon 10:90

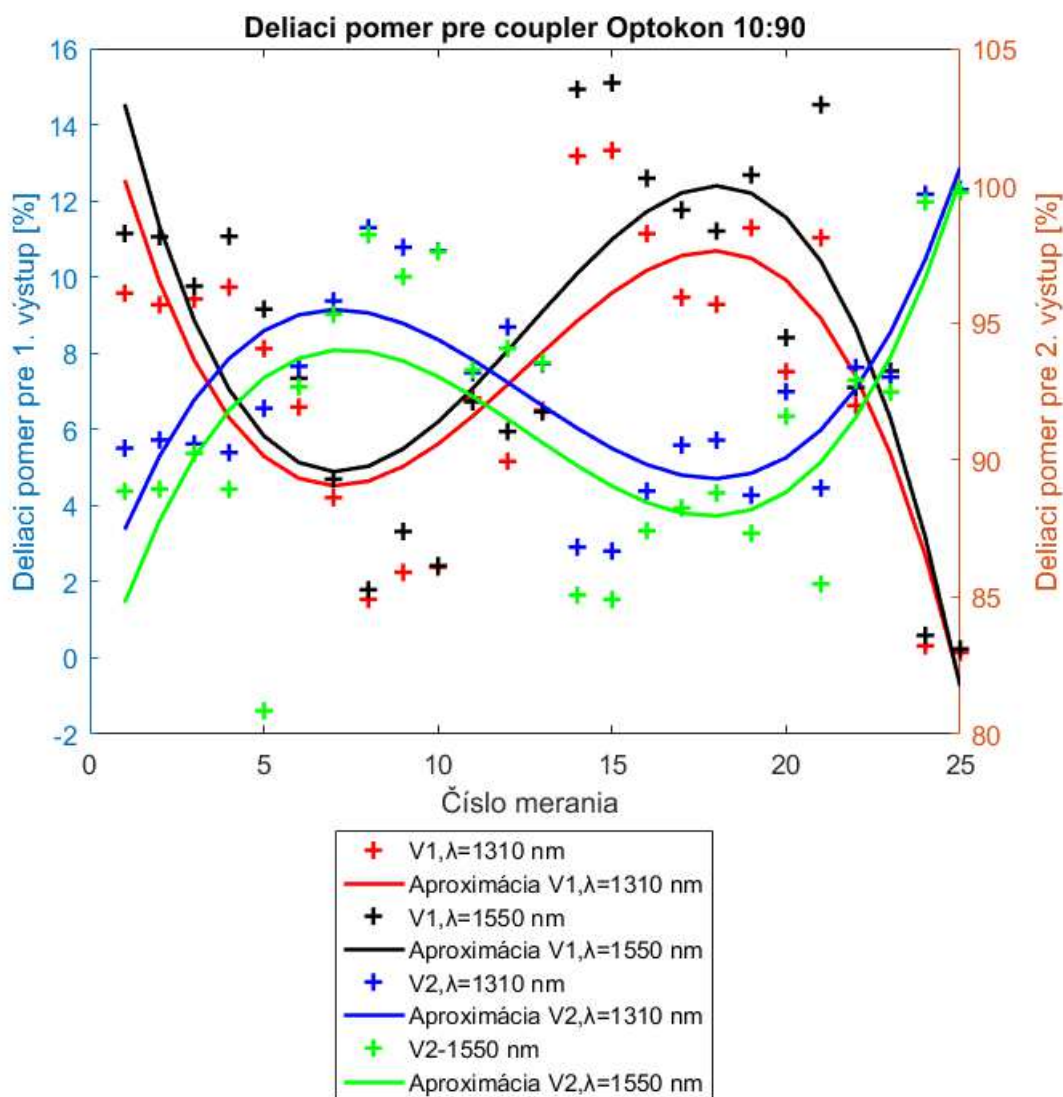
Z grafu vidíme, že vložný útlm pre prvý výstup najskôr stúpal, neskôr začal klesať a pri posledných meraniach výrazne stúpal. Pri druhom výstupe hodnoty vložného útlmu najskôr klesali a až približne v polovici meraní hodnoty stúpili. Neskôr opäť začali postupne klesať. V tabuľke 4.16 môžeme vidieť, že aproximácia druhého výstupu optického couplera nie je veľmi presná.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Tabuľka 4.19: Koeficient determinácie vložného útlmu pre coupler Optokon 10:90

Výstup s λ	R^2
V1, $\lambda=1310$ nm	0,7179
V1, $\lambda=1550$ nm	0,7241
V2, $\lambda=1310$ nm	0,1824
V2, $\lambda=1550$ nm	0,3221

4.5.2 Deliaci pomer



Obrázok 4.17: Graf deliaceho pomeru pre coupler Optokon 10:90

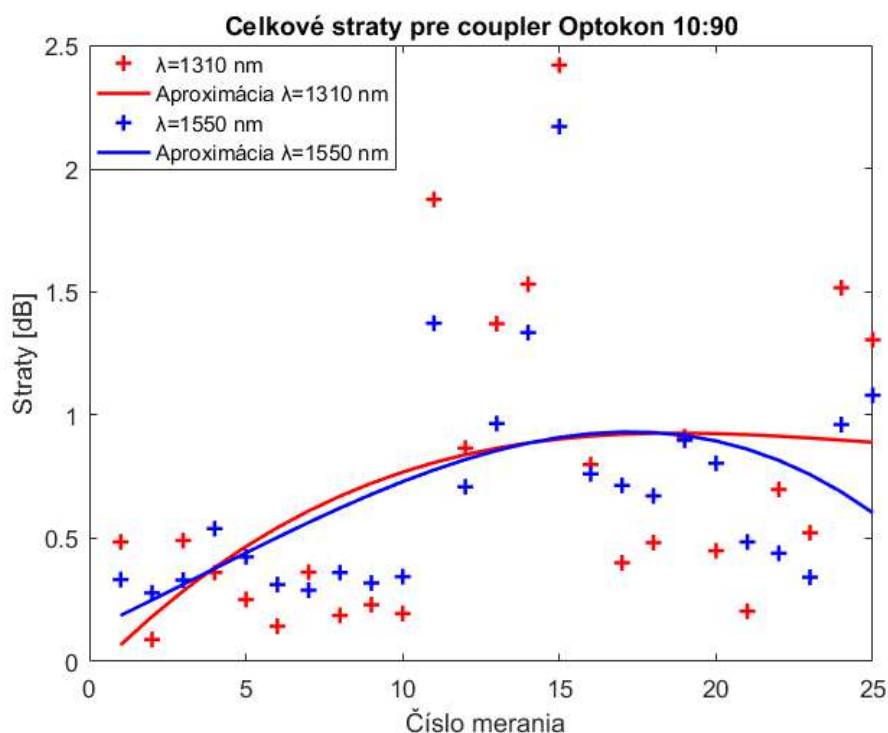
Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

V grafe vidíme, že pomer výstupného výkonu k vstupnému výkonu prvého výstupu sa najskôr znižoval a až v 11 meraní sa hodnota začala postupne zvyšovať. Pri posledných meraniach však hodnota prudko klesla takmer na nulové hodnoty. Namerané hodnoty pre druhý výstup sa prirodzene správali presne opačne ako pri prvom výstupe.

Tabuľka 4.20: *Koeficient determinácie deliaceho pomeru pre coupler Optokon 10:90*

Výstup s λ	R^2
V1, $\lambda=1310$ nm	0,6305
V1, $\lambda=1550$ nm	0,6423
V2, $\lambda=1310$ nm	0,6305
V2, $\lambda=1550$ nm	0,4451

4.5.3 Celkové straty



Obrázok 4.18: *Graf celkových strát pre coupler Optokon 10:90*

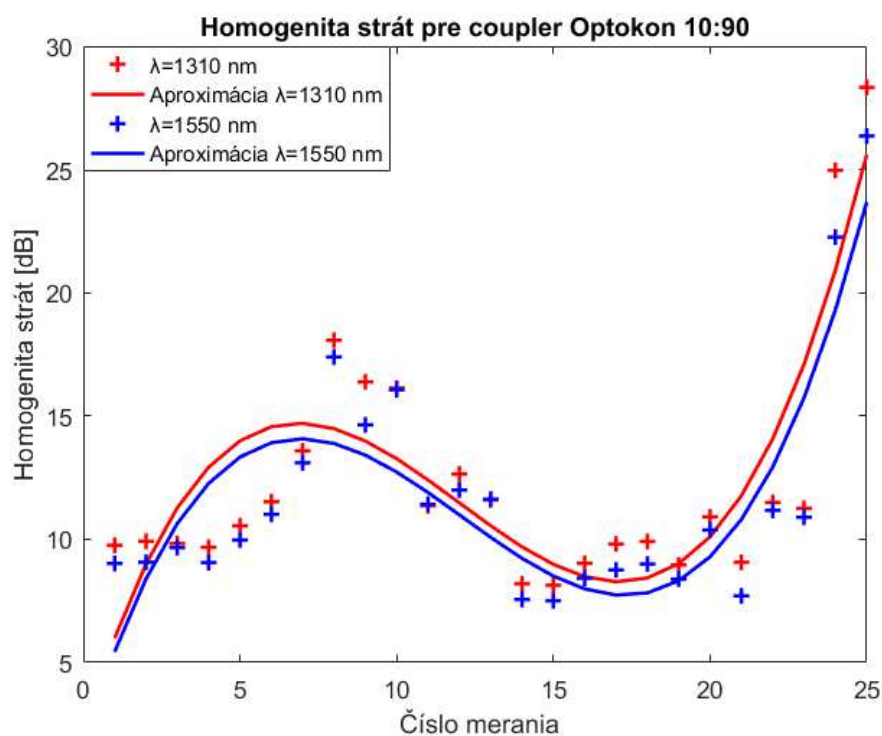
V grafe môžeme pozorovať, že celkové straty sa do desiateho merania pohybovali na nízkych hodnotách. To sa však zmenilo v nasledujúcich štyroch meraniach kedy hodnoty prudko vzrástli. Od pätnásteho merania hodnoty začali klesať až sa dostali na hodnotu ako bola na začiatku meraní. Pri posledných dvoch meraniach hodnota opäť prudko vzrástla.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Tabuľka 4.21: Koeficient determinácie celkových strát pre coupler Optokon 10:90

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,1792
$\lambda=1550$ nm	0,2610

4.5.4 Homogenita strát



Obrázok 4.19: Graf homogenity strát pre coupler Optokon 10:90

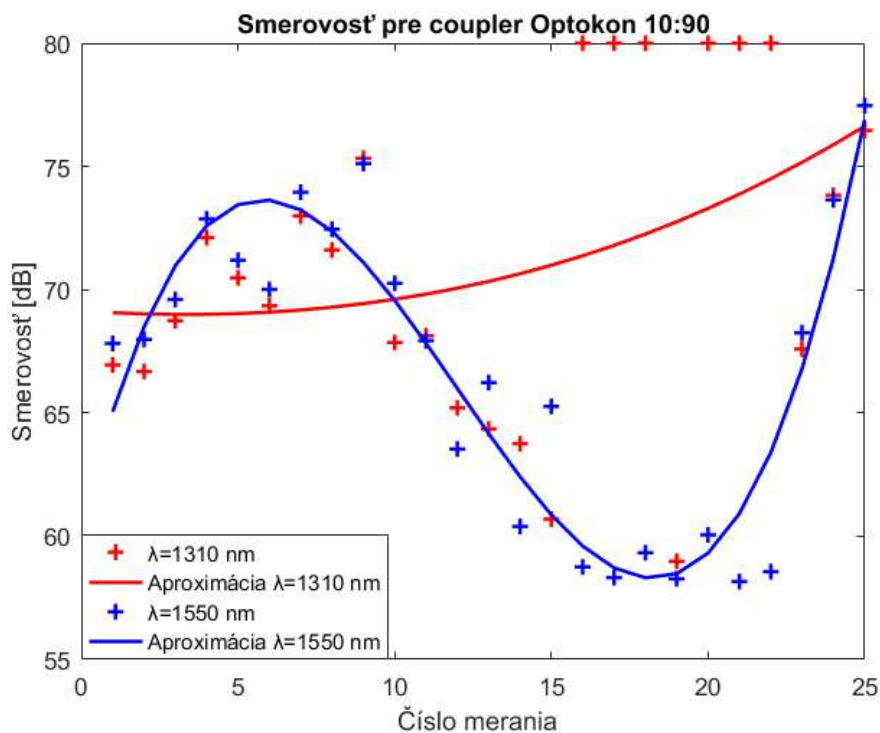
V grafe môžeme vidieť ako sa nám hodnoty postupne zvyšovali a od desiateho merania začali opäť klesať až dosiahli menšie hodnoty ako som namerál na začiatku meraní. Takéto nízke hodnoty som namerál dva krát a homogenita strát začala opäť mierne rásť. V posledných dvoch meraniach začali hodnoty prudko vzrastať. Hodnotu koeficientu determinácie nájdeme v tabuľke 4.19.

Tabuľka 4.22: Koeficient determinácie homogenity strát pre coupler Optokon 10:90

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,7298
$\lambda=1550$ nm	0,7374

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.5.5 Smerovosť



Obrázok 4.20: Graf smerovosti pre coupler Optokon 10:90

V grafe môžeme pozorovať ako sa hodnoty smerovosti postupne zvyšovali a neskôr začali klesať až dosiahli hodnoty okolo 60 dB, ktoré som nameral niekoľko krát. Od dvadsiateho tretieho merania začali hodnoty prudko vzrastať. Pri vlnovej dĺžke 1310 nm si môžeme opäť všimnúť niekoľko hodnôt 80 dB. Tieto hodnoty neboli namerané, nakoľko merací prístroj, ktorý som používal dokáže zmerať hodnotu do 35 pW čo je približne 79 dB, preto som určil tieto hodnoty na 80 dB. Hodnoty koeficientu determinácie nájdeme v tabuľke 4.20.

Tabuľka 4.23: Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Optokon 10:90

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,1393
$\lambda=1550$ nm	0,8681

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.5.6 Zhodnotenie, koeficient aproximácie

Z grafov môžeme pozorovať ako sa vložný útlm začal meniť od prvých meraní v závislosti od výstupu. Pre prvý výstup hodnoty spočiatku stúpali, neskôr klesli približne na počiatočnú hodnotu a ku koncu prudko stúpili. Pri druhom výstupe sa to dialo presne opačne, teda najskôr hodnoty klesali, potom sa výraznejšie zvýšili a neskôr skokovo klesli. Deliaci pomer nám ku koncu meraní zanikol a všetok vstupný výkon vychádzal cez druhý výstup. Straty sa s tepelným namáhaním zvýšili, no nenadobudli takých hodnôt ako coupler Gezhi 10:90. Homogenita vplyvom tepla sa oproti počiatočným meraniam zvýšila takmer trojnásobne. Smerovosť napriek klesaniu neklesla pod hranicu 50 dB čo nám teda poskytuje dostatočný útlm presluchu. V celkovom zhodnotení nám teda tento coupler napriek nižším stratám dopadol horšie kvôli zničenému deliacemu pomeru ako coupler Gezhi 10:90.

Hodnoty aproximácie som dostal pomocou funkcie $polyval(p,x)$, ktorá sa dá zapísať ako rovnica 4.4. Hodnoty $p(1)$ až $p(4)$ som dostal pomocou funkcie $polyfit(x,z,3)$. Hodnota x predstavuje číslo merania, p je premenná, ktorá obsahuje $p(1)$, $p(2)$, $p(3)$ a $p(4)$ a z sú dopočítané hodnoty jednotlivých parametrov optického coupleru. Koeficienty aproximácie $p(1)$ až $p(4)$ nájdeme v tabuľke 4.24.

$$y = p(1) * x^3 + p(2) * x^2 + p(3) * x + p(4) \quad (4.4)$$

Tabuľka 4.24: Hodnoty koeficientu aproximácie pre coupler Optokon 10:90

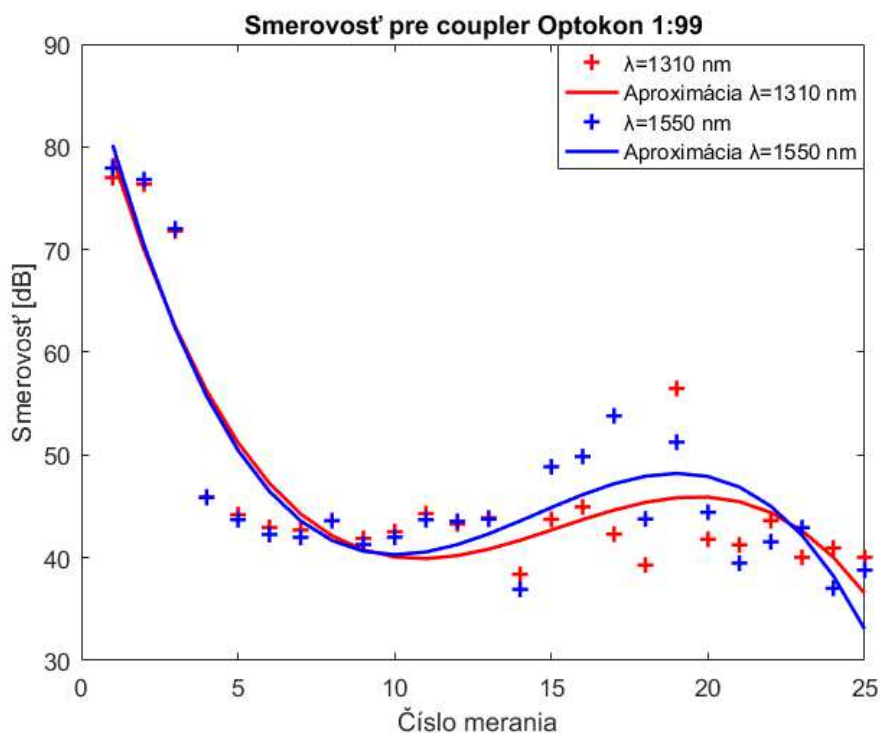
Aproximácia dát polynómom pre coupler Optokon10:90				
Parameter	p(1)	p(2)	p(3)	p(4)
Vložný útlm V1, $\lambda=1310$ nm	0,01158	-0,41862	4,17034	2,86388
Vložný útlm V1, $\lambda=1550$ nm	0,01083	-0,39508	3,97082	2,70747
Vložný útlm V2, $\lambda=1310$ nm	-0,00038	0,01131	-0,04034	0,67070
Vložný útlm V2, $\lambda=1550$ nm	-0,00065	0,02156	-0,14752	0,98419
Deliaci pomer V1, $\lambda=1310$ nm	-0,00970	0,36392	-3,69616	15,88697
Deliaci pomer V1, $\lambda=1550$ nm	-0,01154	0,43468	-4,42815	18,54351
Deliaci pomer V2, $\lambda=1310$ nm	0,00970	-0,36392	3,69616	84,11303
Deliaci pomer V2, $\lambda=1550$ nm	0,01043	-0,39388	4,09123	81,08021
Celkové straty $\lambda=1310$ nm	0,00007	-0,00556	0,13091	-0,05831
Celkové straty $\lambda=1550$ nm	-0,00011	0,00116	0,06001	0,12552
Homogenita strát $\lambda=1310$ nm	0,01196	-0,42992	4,21053	2,19365
Homogenita strát $\lambda=1550$ nm	0,01148	-0,41665	4,11849	1,72278
Smerovosť $\lambda=1310$ nm	0,00016	0,01137	-0,08214	69,13728
Smerovosť $\lambda=1550$ nm	0,01596	-0,57512	5,05695	60,54915

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.6 Optokon 1:99

Pri tomto coupleri som nemohol vytvoriť graf vložného útlmu, deliaceho pomeru, celkových strát ani homogenity z dôvodu, že pri štvrtom meraní som nenameral žiadne hodnoty. Niekoľko krát som nameral určité hodnoty, no boli veľmi malé čo mohol byť aj šum. Pri meraniach som vždy nameral len smerovosť, ktorej graf môžeme vidieť na obrázku 4.21.

4.6.1 Smerovosť



Obrázok 4.21: Graf smerovosti pre coupler Optokon 1:99

Z grafu už môžeme vidieť, že coupler bol zničený keď nám začala prudko klesať smerovosť, ktorá sa na určitú dobu ustálila približne na polovici pôvodnej hodnoty. Neskôr začala postupne stúpať no pri posledných meraniach začala opäť klesať. V tabuľke 4.21 môžeme vidieť hodnoty koeficientu determinácie pre graf smerovosti coupleru Optokon 1:99.

Tabuľka 4.25: Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Optokon 1:99

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,8052
$\lambda=1550$ nm	0,8108

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.6.2 Zhodnotenie, hodnoty aproximácie

Keďže tento coupler sa zničil už po treťom meraní a dali sa namerat' len smerovosti, ktoré čím ďalej tým viac klesali. Môžeme teda povedať, že coupler sa zničil vplyvom tepelného namáhania, ktorému bol vystavený. Je možné, že tento coupler mohol mať chybu od výroby, keďže bol dimenzovaný do rovnakej teploty ako ostatné optické couplere firmy Optokon, ktorým sa síce postupne zhoršili jednotlivé parametre ale dali sa namerat'. Tento coupler, kvôli svojmu zničeniu, tak dopadol najhoršie zo všetkých použitých couplerov.

Hodnoty aproximácie som dostal pomocou funkcie $polyval(p,x)$, ktorá sa dá zapísať ako rovnica 4.5. Hodnoty $p(1)$ až $p(4)$ som dostal pomocou funkcie $polyfit(x,z,3)$. Hodnota x predstavuje číslo merania, p je premenná, ktorá obsahuje $p(1)$, $p(2)$, $p(3)$ a $p(4)$ a z sú dopočítané hodnoty jednotlivých parametrov optického coupleru. Koeficienty aproximácie $p(1)$ až $p(4)$ nájdeme v tabuľke 4.26.

$$y = p(1) * x^3 + p(2) * x^2 + p(3) * x + p(4) \quad (4.5)$$

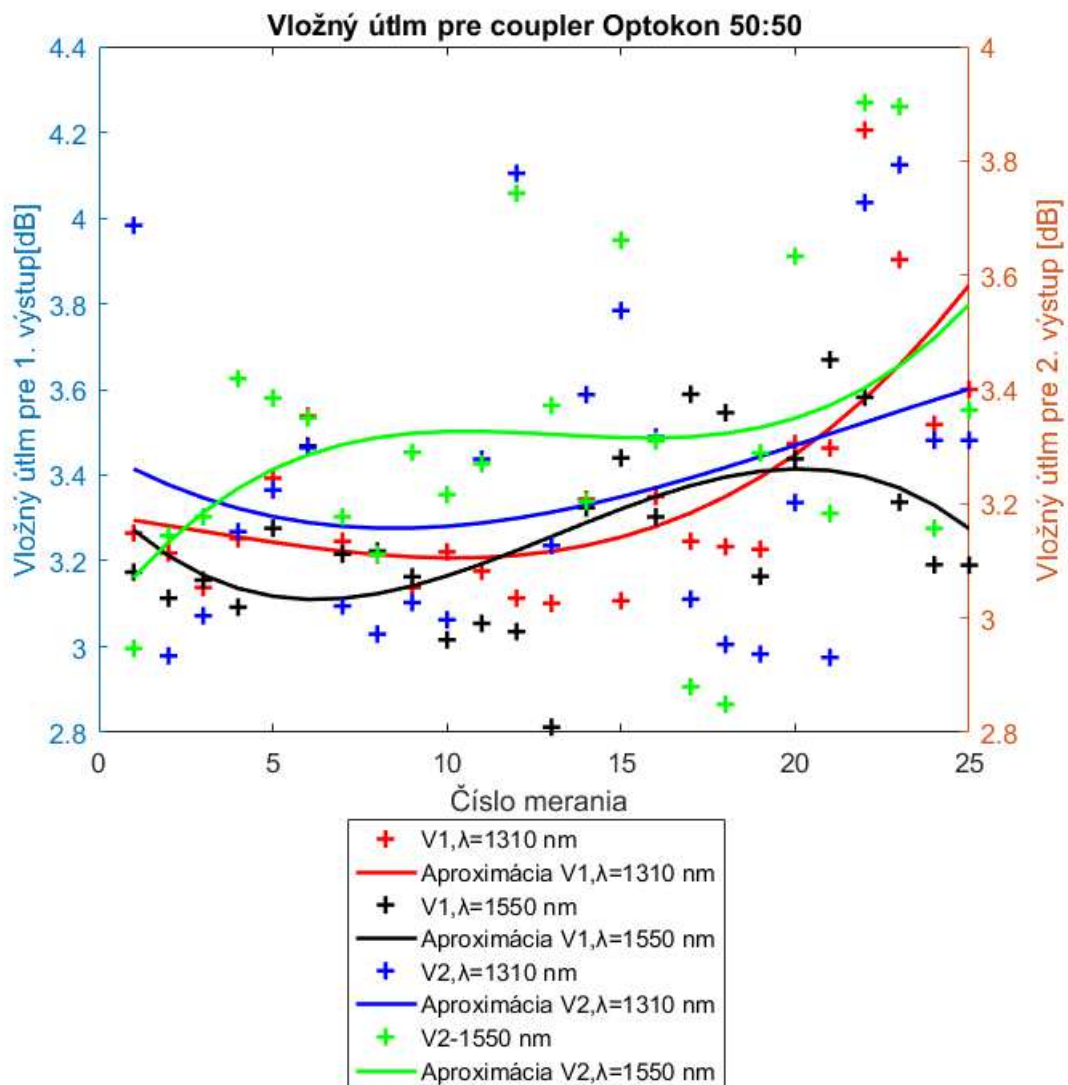
Tabuľka 4.26: Hodnoty koeficientu aproximácie smerovosti pre coupler Optokon 1:99

Aproximácia dát polynómom pre coupler Gezhi 10:90				
Parameter	p(1)	p(2)	p(3)	p(4)
Smerovosť $\lambda=1310\text{nm}$	-0,01757	0,80258	-11,19240	89,30994
Smerovosť $\lambda=1550\text{nm}$	-0,02177	0,94808	-12,44532	91,71213

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.7 Optokon 50:50

4.7.1 Vložný útlm



Obrázok 4.22: Graf vložného útlmu pre coupler Optokon 50:50

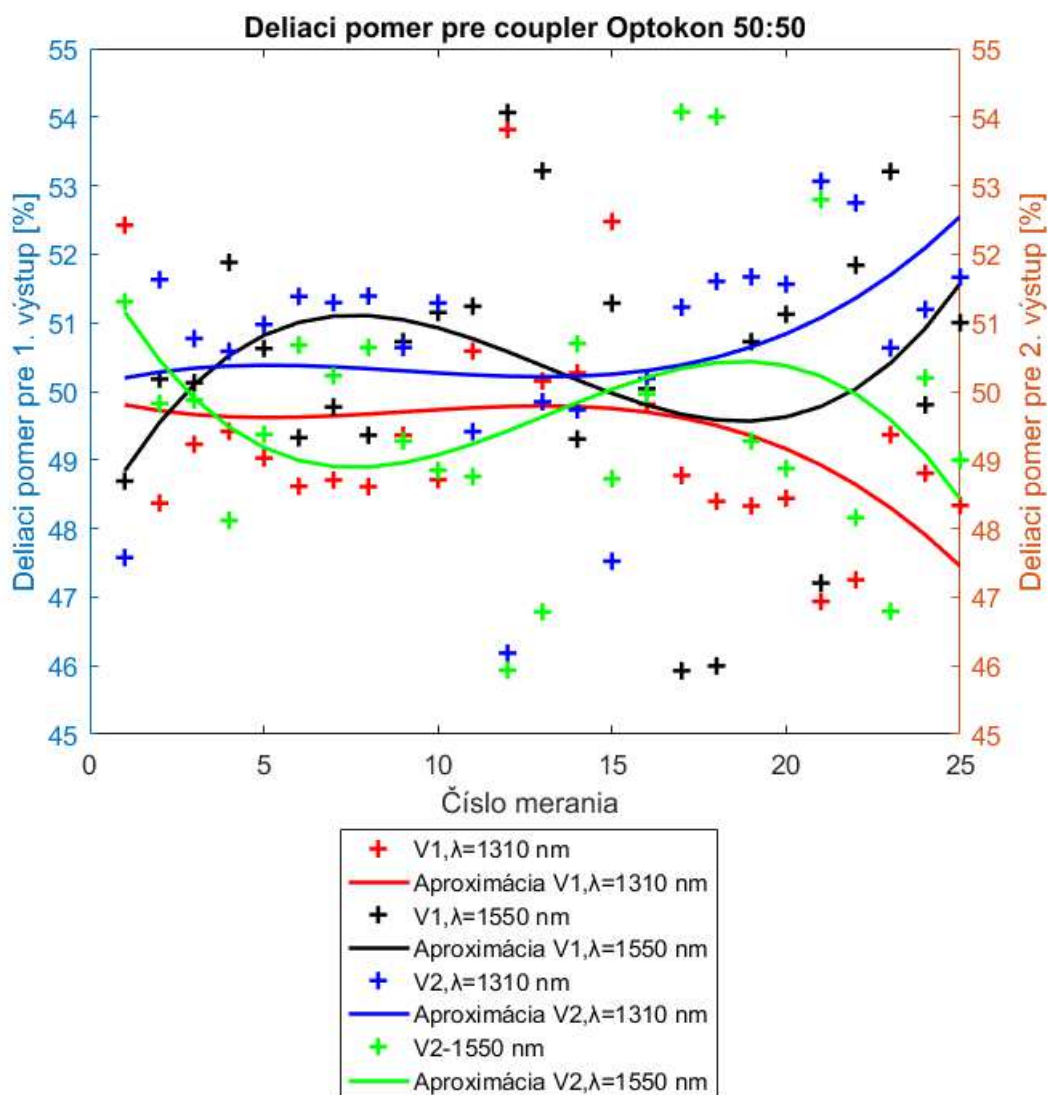
Z grafu môžeme vidieť, že hodnoty pre prvý výstup pri vlnovej dĺžke 1310 nm boli striedavo stúpavo klesajúce, no v celkovom zhodnotení postupne stúpali. Pri rovnakom výstupe ale pri vlnovej dĺžke 1550 nm hodnoty boli opäť striedavo klesajúce, no z krivky môžeme vidieť, že toto striedanie bolo výraznejšie. Pri druhom výstupe a vlnovej dĺžke 1310 nm vidíme, že aj keď bolo veľa nameraných hodnôt približne rovnakých celkovo nám vložný útlm postupne stúpali. Pre vlnovú dĺžku 1550 nm vložný útlm na začiatku stúpol, neskôr striedavo menil stúpanie s klesaním no z aproximácie vidíme, že celkovo začal pri posledných meraniach opäť stúpať.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Tabuľka 4.27: Koeficient determinácie vložného útlmu pre coupler Optokon 50:50

Výstup s λ	R^2
V1, $\lambda=1310$ nm	0,4902
V1, $\lambda=1550$ nm	0,2783
V2, $\lambda=1310$ nm	0,0741
V2, $\lambda=1550$ nm	0,1291

4.7.2 Deliacci pomer



Obrázok 4.23: Graf deliaceho pomeru pre coupler Optokon 50:50

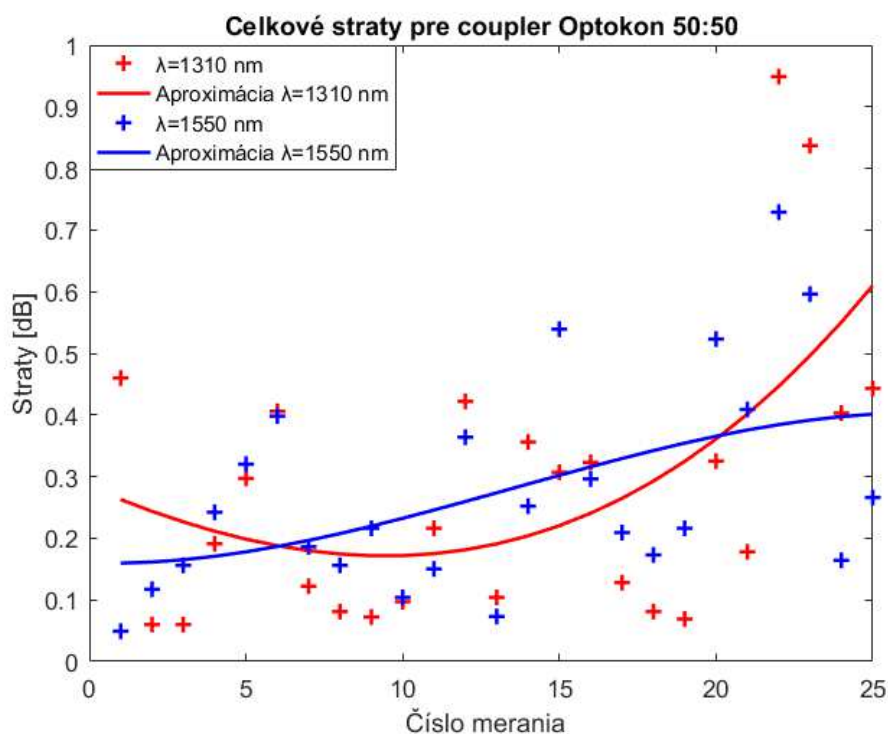
Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

V grafe môžeme pozorovať, že aproximácia obidvoch výstupov pre vlnovú dĺžku 1310 nm sa dlhú dobu viac menej nemenila no ku koncu meraní sa deliaci pomer začal meniť v prospech druhého výstupu. Pre vlnovú dĺžku 1550 nm je aproximácia zaujímavejšia, kde môžeme pozorovať neustále meniaci sa pomer, ktorý pri posledných meraniach bol čím ďalej viac výhodnejší pre prvý výstup.

Tabuľka 4.28: *Koeficient determinácie deliaceho pomeru pre coupler Optokon 50:50*

Výstup s λ	R^2
V1, $\lambda=1310$ nm	0,1618
V1, $\lambda=1550$ nm	0,1148
V2, $\lambda=1310$ nm	0,1618
V2, $\lambda=1550$ nm	0,1149

4.7.3 Celkové straty



Obrázok 4.24: *Graf celkových strát pre coupler Optokon 50:50*

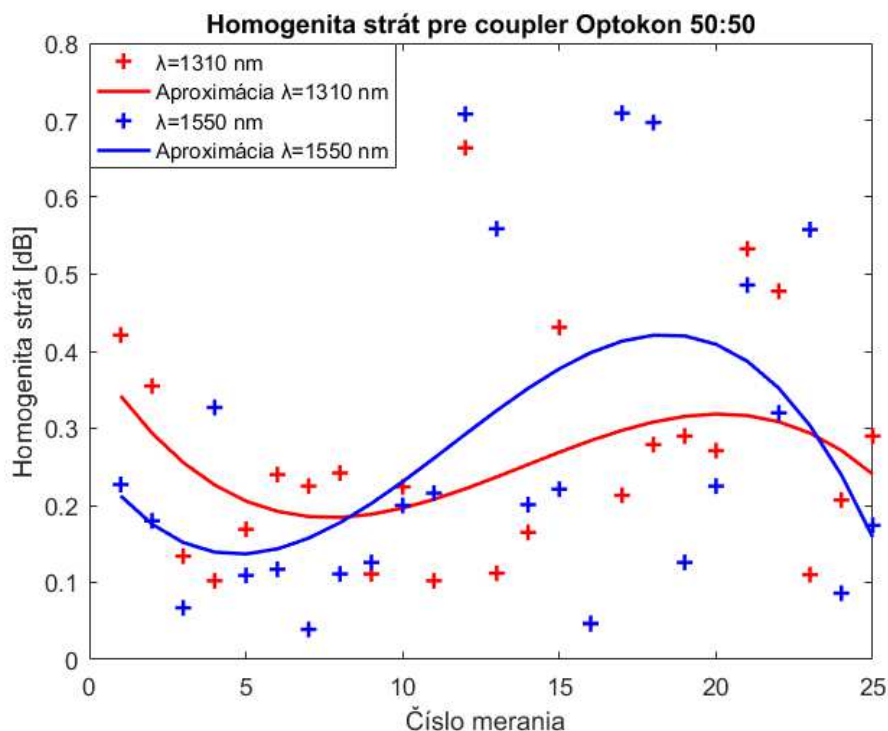
V grafe pozorujeme, že celkové straty sa pre vlnovú dĺžku 1550 nm neustále striedavo menili, no z aproximácie môžeme vidieť, že sa postupne stále tieto straty zvyšovali. Straty pre vlnovú dĺžku 1310 nm, rovnako ako pri vlnovej dĺžke 1550 nm, sa nemenili plynule ale skokovo, avšak z aproximácie môžeme vidieť, že najskôr klesali a približne od desiateho merania hodnoty strát postupne stúpali až do konca meraní.

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

Tabuľka 4.29: Koeficient determinácie celkových strát pre coupler Optokon 50:50

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,3044
$\lambda=1550$ nm	0,2428

4.7.4 Homogenita strát



Obrázok 4.25: Graf homogenity strát pre coupler Optokon 50:50

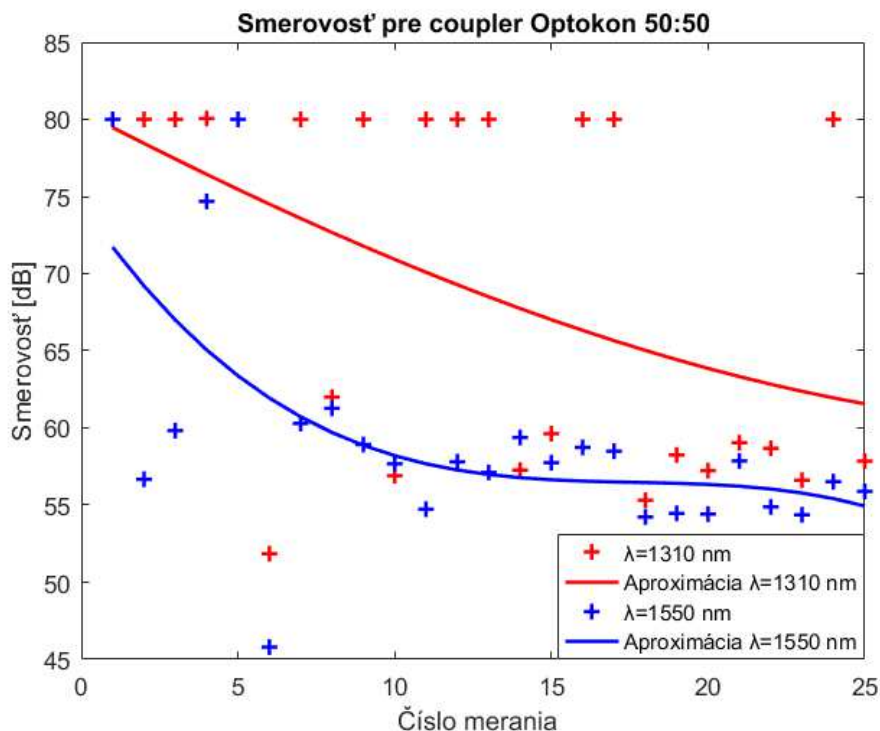
V grafe pozorujeme ako nám hodnoty homogenity strát pre vlnovú dĺžku 1550 nm na začiatku meraní mierne klesli no začali opäť rásť približne od ôsmeho merania. Pri šestnástom meraní hodnota skokovo klesla no hneď potom začala opäť rásť. Posledné merania opäť ukazujú skokový pokles hodnoty. Pri porovnaní aproximácií dát môžeme vidieť, že priebeh majú rovnaký, len pre vlnovú dĺžku 1310 nm nie je taký výrazný ako pri vlnovej dĺžke 1550 nm.

Tabuľka 4.30: Koeficient determinácie homogenity strát pre coupler Optokon 50:50

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,1074
$\lambda=1550$ nm	0,2349

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.7.5 Smerovosť



Obrázok 4.26: Graf smerovosti pre coupler Optokon 50:50

V grafe vidíme, že vlnová dĺžka 1310 nm má veľa hodnôt 80 dB. Tieto hodnoty som zvolil, pretože merací prístroj, ktorý som používal pri meraní, dokázal merať iba do hodnoty 35 pW, čo je približne 79 dB. Preto som pre všetky nenamerané hodnoty zvolil hodnotu smerovosti 80 dB. Z nameraných hodnôt pre túto vlnovú dĺžku môžeme pozorovať pokles, čo nám potvrdzuje aj aproximácia. Pri vlnovej dĺžke 1550 nm som nenameral len dve hodnoty, z nameraných vidíme najskôr skokový no neskôr postupný pokles.

Tabuľka 4.31: Koeficient determinácie smerovosti pre coupler Optokon 50:50

Výstup s λ	R^2
$\lambda=1310$ nm	0,2333
$\lambda=1550$ nm	0,3454

Error! Use the Home tab to apply Nadpis 1;ZP-Nadpis 1 to the text that you want to appear here.

4.7.6 Zhodnotenie, hodnoty aproximácie

Pri porovnaní výsledkov coupleru Optokon 50:50 s couplerom Gezhi 50:50, môžeme povedať, že hodnoty vložného útlmu aj pri postupnom zvyšovaní nedosiahli také hodnoty ako hodnoty coupleru Gezhi 50:50. Deliaci pomer sa pohyboval v rozmedzí od 46 % do 54 %, čo sú lepšie výsledky ako pri coupleri Gezhi, kde bol najväčší pomer 42:58. Celkové straty, ktoré neprekročili hranicu 1 dB boli tiež lepšie pri tomto coupleri ako pri coupleri Gezhi 50:50, kde boli straty pri vlnovej dĺžke 1550 nm takmer 8 dB. Hodnoty homogenity vyšli mierne zvýšené oproti coupleru Gezhi 50:50 nie však nejak výrazne. Môžeme si všimnúť ako hodnota smerovosti postupne klesá a v jednom meraní nám vyšla dokonca pod 50 dB, čo sa nám pri coupleri Gezhi 50:50 nevyskytlo.

Hodnoty aproximácie som dostal pomocou funkcie $polyval(p,x)$, ktorá sa dá zapísať ako rovnica 4.6. Hodnoty $p(1)$ až $p(4)$ som dostal pomocou funkcie $polyfit(x,z,3)$. Hodnota x predstavuje číslo merania, p je premenná, ktorá obsahuje $p(1)$, $p(2)$, $p(3)$ a $p(4)$ a z sú dopočítané hodnoty jednotlivých parametrov optického coupleru. Koeficienty aproximácie $p(1)$ až $p(4)$ nájdeme v tabuľke 4.26.

$$y = p(1) * x^3 + p(2) * x^2 + p(3) * x + p(4) \quad (4.6)$$

Tabuľka 4.32: Hodnoty koeficientu aproximácie pre coupler Optokon 50:50

Aproximácia dát polynómom pre coupler Optokon 50:50				
Parameter	p(1)	p(2)	p(3)	p(4)
Vložný útlm V1, $\lambda=1310$ nm	0,00008	-0,00065	-0,01135	3,30667
Vložný útlm V1, $\lambda=1550$ nm	-0,00023	0,00900	-0,08559	3,34897
Vložný útlm V2, $\lambda=1310$ nm	-0,00004	0,00258	-0,03509	3,29344
Vložný útlm V2, $\lambda=1550$ nm	0,00016	-0,00639	0,08078	2,99576
Deliaci pomer V1, $\lambda=1310$ nm	-0,00068	0,01863	-0,13703	49,92349
Deliaci pomer V1, $\lambda=1550$ nm	0,00224	-0,08836	0,95578	47,96905
Deliaci pomer V2, $\lambda=1310$ nm	0,00068	-0,01863	0,13703	50,07651
Deliaci pomer V2, $\lambda=1550$ nm	-0,00224	0,08839	-0,95588	52,03093
Celkové straty $\lambda=1310$ nm	0,00002	0,00084	-0,02183	0,28379
Celkové straty $\lambda=1550$ nm	-0,00003	0,00116	-0,00151	0,15994
Homogenita strát $\lambda=1310$ nm	-0,00014	0,00582	-0,06474	0,40118
Homogenita strát $\lambda=1550$ nm	-0,00022	0,00775	-0,05847	0,26337
Smerovosť $\lambda=1310$ nm	0,00015	0,00811	-1,05599	80,52151
Smerovosť $\lambda=1550$ nm	-0,00315	0,16684	-2,98756	74,53878

Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo určiť vplyv tepelného namáhania na parametre optických couplerov vrátane teoretického rozboru optických sietí, ktorých je optický coupler dôležitou súčasťou, a teoretického rozboru optického coupleru a jeho parametrov.

Preto môžeme túto bakalársku prácu rozdeliť na dve hlavné časti. Prvá časť je teoretická, v ktorej boli vypracované prvé dva body zadania. Druhá časť, ktorá je praktická, sa už venuje samotnému meraniu optických couplerov a spracovaniu nameraných a dopočítaných hodnôt do grafov.

V prvej kapitole, ktorá má dve podkapitoly sme si priblížili optické siete. Prvá podkapitola sa zaoberá základným delením optických prístupových sietí a v druhej podkapitole môžeme nájsť priblíženie k pasívnym optickým sieťam a ich jednotlivých typov. Druhá kapitola sa zaoberá optickými couplermi. Na začiatku si rozdelíme couplere podľa zdroju napájania, rozbočovacieho pomeru a výrobného procesu, ktorý je jednotlivo bližšie popísaný v nasledujúcich dvoch podkapitolách. Ďalšia kapitola sa zaoberá popisom merania, či už počiatočným alebo pod tepelným namáhaním. Ďalej tu nájdeme popis jednotlivých parametrov so vzorovými výpočtami, ktoré som dopočítal z nameraných hodnôt. Dopocítané parametre sú: vložný útlm, deliaci pomer, celkové straty, homogenita strát a smerovosť. V ďalšej kapitole nájdeme grafické vyobrazenie s popisom pre každý coupler a parameter zvlášť. V grafoch okrem dopocítaných hodnôt môžeme nájsť aj aproximáciu týchto hodnôt, hodnoty aproximácie sa nachádzajú na konci podkapitoly daného coupleru. V tabuľke pod každým grafom je zobrazená hodnota koeficientu determinácie, čo je závislosť aproximácie od skutočných hodnôt.

Vyhodnotením meraní sme potvrdili predpoklad, že jednotlivé parametre sa budú pod tepelným namáhaním postupne zhoršovať. Pri porovnaní couplerov môžeme zhrnúť, že couplerom Gezhi sa po dlhodobom tepelnom namáhaní začnú výrazne zvyšovať hodnoty vložného útlmu a celkového útlmu. Deliaci pomer sa taktiež zhoršuje, avšak úplne nezanične ako sa to stalo pri coupleri Optokon 10:90. Smerovosť ostáva aj napriek tepelnému namáhaniu na vysokej hodnote nad 50 dB. Couplere Optokon dosahovali aj po tepelnom namáhaní menšie celkové straty ako couplere Gezhi. Avšak celkovo dopadli horšie keďže nám pri meraní zanikol deliaci pomer pri coupleri 10:90 a coupler 1:99 sa zničil pri prvých meraniach pod tepelným namáhaním.

Použitá literatura

- [1] LAFATA, Pavel - Jareš, Petr. Testovací optická přístupová síť EPON a její využití ve výuce cvut.cz [online]. [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=testovaci-opticka-pristupova-sit-epon-a-jeji-vyuziti-ve-vyuce&cislocclanku=2008110003>
- [2] LAFATA, Pavel - Vodrážka, Jiří. Optické přístupové sítě a přípojky FTTx. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014, 294 s. ISBN 80 978-80-01-05463-5.
- [3] LAFATA, Pavel. Pasívní optické sítě s rychlostí 10 Gbit/s [online].[cit 2016-12-12]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticke-site-s-rychlosti-10-gbits&cislocclanku=2011030001>
- [4] LAFATA, Pavel. Pasívní optické sítě WDM-PON [online].[cit 2017-20-1]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticke-site-wdmpon&cislocclanku=2009050004>
- [5] DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) [online].[cit. 2017-10-2] . Dostupné z: <http://www.pandacomdirekt.com/en/technologies/wdm/what-is-dwdm.html>
- [6] BISWANATH, Mukherjee. Optical WDM Networks. Department of Computer Science, University of California, 2006, 953s. ISBN 0-387-29055-9, e-ISBN 0-387-29188-1
- [7] Fiber Optic Couplers [online].[cit. 2017-20-1]. Dostupné z: <http://www.fs.com/blog/fiber-optic-couplers.html>
- [8] Fiber Optic Couplers [online].[cit. 2017-1-22]. Dostupné z: <http://www.tpub.com/neets/tm/108-11.htm>
- [9] MAODE, Ma. Current Research Progress of Optical Networks. Springer Science+Business Media B.V., 2009, 280 s. ISBN 978-1-4020-9888-8, e-ISBN 978-1-4020-9889-5
- [10] FBR Splitter Couplers [online].[cit. 2017-1-29] Dostupné z: <http://www.fiberopticshare.com/fbt-splitter-couplers.html>
- [11] The Advantages And Disadvantages Of The FBT Couplers [online].[cit. 2017-1-29] Dostupné z: <http://www.fs.com/blog/the-advantages-and-disadvantages-of-the-fbt-coupler.html>
- [12] The Advantages and Disadvantages of the PLC Splitter [online].[2017-1-29] Dostupné z: <http://www.fs.com/blog/the-advantages-and-disadvantages-of-the-plc-optical-power-splitter.html>
- [13] O vláknovej optike [online].[2017-3-15] Dostupné z: <http://www.zvaranieoptiky.sk/o-vlaknovej-optike/casto-kladene-otazky/>
- [14] Linear Regression [online].[2017-30-3] Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/linear-regression.html
- [15] BABUŠÍKOVÁ, Jela. Matlab [online].[2017-30-3] Dostupné z: <http://hore.dnom.fmph.uniba.sk/~babusikova/esf/matlab.pdf>

Zoznam príloh

Príloha A: Príloha na CD - zložky so súborami Excel, ktoré obsahujú namerané a dopočítané hodnoty jednotlivých couplerov

Adresárová štruktúra priloženého CD:

- December
 - Couplere 7.12.xlsx
 - Couplere 14.12.xlsx
 - Couplere 19.12.xlsx
- Február
 - Couplere 1.2.xlsx
 - Couplere 7.2.xlsx
 - Couplere 14.2.xlsx
 - Couplere 21.2.xlsx
 - Couplere 28.2.xlsx
- Január
 - Couplere 5.1.xlsx
 - Couplere 11.1.xlsx
 - Couplere 18.1.xlsx
 - Couplere 24.1.xlsx
- Marec
 - Couplere 7.3.xlsx
 - Couplere 14.3.xlsx
 - Couplere 21.3.xlsx
 - Couplere 28.3.xlsx
- November
 - Couplere 2.11.xlsx
 - Couplere 9.11.xlsx
 - Couplere 16.11.xlsx
 - Couplere 23.11.xlsx
 - Couplere 30.11.xlsx
- Október
 - Couplere 12.10.xlsx
 - Couplere 19.10.xlsx
 - Couplere 26.10.xlsx
- Počiatočné meranie
 - Couplere 21.9. počiatočné meranie.xlsx