

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

Analýza vlivu tepelného namáhání optických couplerů

Analysis the Effect of Temperature Loading on the Optical Coupler

Zadání bakalářské práce

Student:

Daniel Plšek

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Analýza vlivu tepelného namáhání optických couplerů
Analysis the Effect of Temperature Loading on the Optical Coupler

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je zjistit vliv tepelného namáhání na vybrané parametry optických couplerů. Zkoumané parametry optických couplerů jsou vložný útlum, dělicí poměr, celkové ztráty, homogenita útlumu a směrovost.

1. Teoretický rozbor optického coupleru a jeho parametrů.
2. Popis zatěžování optických couplerů teplotním namáháním.
3. Popis měření útlumových parametrů optických couplerů.
4. Měření optických couplerů zvýšenou teplotou nad 90 stupňů celsia.
5. Vyhodnocení změnových charakteristik optických couplerů.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] KARTALOPOULOS, Stamatios V. Introduction to DWDM technology: data in a rainbow. Bellingham, Wash.: SPIE Optical Engineering Press, c2000, xxii, 252 p. ISBN 0780353994.

[2] DERICKSON, Dennis. Fiber optic test and measurement. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, c1998, xx, 642 p. ISBN 0135343305.

[3] DUTTA K., Achyut a Masahiko FUJIWARA. WDM technologies: passive optical components. Amsterdam: Academic Press, c2003, xix, 513 s. ISBN 0122252624.

[4] 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.

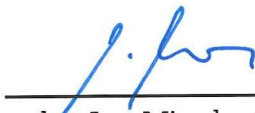
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Nedoma**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Lukáš Bednárek

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



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





prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 20. dubna 2018



.....
podpis studenta

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Nedomovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Lukášovi Bednárkovi za jejich vstřícný přístup, odborné rady a konzultace při vytváření této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá pasivním optickým rozbočovačem, neboli optickým couplerem. Cílem mé bakalářské práce bylo analyzovat vliv tepelného namáhání na útlumové parametry optického coupleru. Celá práce je rozdělena na dvě části. První část pojednává o základních informacích souvisejících s optickým couplerem. Zde patří například teoretický rozbor zdroje záření, optického vlákna, aktivní a pasivní optické sítě nebo optického coupleru. Ve druhé části se pak řeší popis měření útlumových parametrů a vyhodnocení změřených charakteristik optických couplerů.

Klíčová slova: zdroj záření, optické vlákno, aktivní optická síť, pasivní optická síť, optický coupler.

Abstract

This bachelor thesis focus on the optical coupler. The main goal of my bachelor thesis is to analyze the effect of heat on attenuation parameters of a coupler. Bachelor thesis can be split into two parts. The theoretical part is mentioned basic information related to an optical coupler. It contains basic information of the source of light, optical fiber, active and passive optical network or optical coupler. In second parts is mentioned in a measurement of attenuation parameters and evaluation of measured characteristics of optical couplers.

Key Words: source of light, optical fiber, active optical network, passive optical network, coupler

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
1 Úvod	14
2 Teoretický rozbor optického coupleru a jeho parametrů	15
2.1 Světlo	15
2.2 Optická vlákna	16
2.3 Jednovidová optická vlákna	16
2.4 Mnohavidová optická vlákna	17
2.5 Zdroje záření	18
2.6 Optická přístupová síť	19
2.7 Aktivní optická síť (AON)	19
2.8 Pasivní optická síť (PON)	20
2.9 Optické přípojky FTTx	21
2.10 Optický coupler	22
3 Popis zatěžování optických couplerů teplotním namáháním	29
4 Popis měření útlumových parametrů optických couplerů	30
5 Měření a vyhodnocení charakteristik optických couplerů	31
5.1 Gezhi 10:90	32
5.2 Gezhi 1:99	37
5.3 Gezhi 50:50	42
5.4 Optokon 10:90	47
5.5 Optokon 1:99	52
5.6 Optokon 50:50	54
6 Závěr a vyhodnocení	59
6.1 Gezhi	59
6.2 Optokon	60
Odkazy	63
Přílohy	64

Seznam použitých zkratek a symbolů

λ	– Vlnová délka
dB	– Decibel
P	– Výkon
AON	– Active Optical Network (aktivní optická síť)
PON	– Passive Optical Network (pasivní optická síť)
ODN	– Optical Distribution Network (optická distribuční síť)
OAN	– Optical Access Network (Optická přístupová síť)
OLT	– Optical Line Termination (optické linkové zakončení)
ONT	– Optical Network Termination (optické síťové zakončení)
ONU	– Optical Network Unit (Optická síťová jednotka)
PLC	– Planar Lightwave Circuit (planární světlovod)
FBT	– Fused Bionic Taper (technologie přiblížení jader vláken)
P2P	– Point-to-point (bod-bod)
P2MP	– Point-to-multipoint (mnohobodové)
FTTB	– Fiber To The Building
FTTH	– Fiber To The Home
FTTO	– Fiber To The Office
FTTP	– Fiber To The Premises
FTTC	– Fiber To The Crub
FTTN	– Fiber To The Node
FTTEx	– Fiber To The Exchange

Seznam obrázků

1	Světelné spektrum	15
2	Jednovidové optické vlákno	16
3	Mnohovidové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu	17
4	Mnohovidové optické vlákno s plynulou změnou indexu lomu	17
5	Coupler typu Y	22
6	Coupler typu T	22
7	Coupler typu 2x2	23
8	Coupler typu hvězda	23
9	Coupler typu strom	24
10	Znázornění PLC coupleru	25
11	PLC coupler	25
12	stočení vláken	26
13	působení teploty	26
14	působení tahu	26
15	úprava na požadovanou strukturu	27
16	Schéma měření výkonu	30
17	Vložený útlum: Gezhi 10:90	32
18	Dělicí poměr: Gezhi 10:90	33
19	Celkové ztráty: Gezhi 10:90	34
20	Homogenita útlumu: Gezhi 10:90	35
21	Směrovost: Gezhi 10:90	36
22	Vložený útlum: Gezhi 1:99	37
23	Dělicí poměr: Gezhi 1:99	38
24	Celkové ztráty: Gezhi 1:99	39
25	Homogenita útlumu: Gezhi 1:99	40
26	Směrovost: Gezhi 1:99	41
27	Vložený útlum: Gezhi 50:50	42
28	Dělicí poměr: Gezhi 50:50	43
29	Celkové ztráty: Gezhi 50:50	44
30	Homogenita útlumu: Gezhi 50:50	45
31	Směrovost: Gezhi 50:50	46
32	Vložený útlum: Optokon 10:90	47
33	Dělicí poměr: Optokon 10:90	48
34	Celkové ztráty: Optokon 10:90	49
35	Homogenita útlumu: Optokon 10:90	50
36	Směrovost: Optokon 10:90	51
37	Vložený útlum: Optokon 1:99	52

38	Směrovost: Optokon 1:99	53
39	Vložený útlum: Optokon 50:50	54
40	Dělicí poměr: Optokon 50:50	55
41	Celkové ztráty: Optokon 50:50	56
42	Homogenita útlumu: Optokon 50:50	57
43	Směrovost: Optokon 50:50	58
44	Gezhi - úroveň deformace couplerů	59
45	Optokon - úroveň deformace couplerů	61

Seznam tabulek

1	Vložený útlum Gezhi 10x90	32
2	Vložený útlum Gezhi 10x90	32
3	Měření 1: Dělicí poměr Gezhi 10:90	33
4	Měření 30: Dělicí poměr Gezhi 10:90	33
5	Měření 1: Celkové ztráty Gezhi 10:90	34
6	Měření 30: Celkové ztráty Gezhi 10:90	34
7	Měření 1: Homogenita útlumu Gezhi 10:90	35
8	Měření 30: Homogenita útlumu Gezhi 10:90	35
9	Měření 1: Směrovost Gezhi 10:90	36
10	Měření 30: Směrovost Gezhi 10:90	36
11	Vložený útlum Gezhi 1:99	37
12	Vložený útlum Gezhi 1:99	37
13	Měření 1: Dělicí poměr Gezhi 1:99	38
14	Měření 30: Dělicí poměr Gezhi 1:99	38
15	Měření 1: Celkové ztráty Gezhi 1:99	39
16	Měření 30: Celkové ztráty Gezhi 1:99	39
17	Měření 1: Homogenita útlumu Gezhi 1:99	40
18	Měření 30: Homogenita útlumu Gezhi 1:99	40
19	Měření 1: Směrovost Gezhi 1:99	41
20	Měření 30: Směrovost Gezhi 1:99	41
21	Vložený útlum Gezhi 50:50	42
22	Vložený útlum Gezhi 50:50	42
23	Měření 1: Dělicí poměr Gezhi 50:50	43
24	Měření 30: Dělicí poměr Gezhi 50:50	43
25	Měření 1: Celkové ztráty Gezhi 50:50	44
26	Měření 30: Celkové ztráty Gezhi 50:50	44
27	Měření 1: Homogenita útlumu Gezhi 50:50	45
28	Měření 30: Homogenita útlumu Gezhi 50:50	45
29	Měření 1: Směrovost Gezhi 50:50	46
30	Měření 30: Směrovost Gezhi 50:50	46
31	Vložený útlum Optokon 10:90	47
32	Vložený útlum Optokon 10:90	47
33	Měření 1: Dělicí poměr Optokon 10:90	48
34	Měření 30: Dělicí poměr Optokon 10:90	48
35	Měření 1: Celkové ztráty Optokon 10:90	49
36	Měření 30: Celkové ztráty Optokon 10:90	49
37	Měření 1: Homogenita útlumu Optokon 10:90	50

38	Měření 30: Homogenita útlumu Optokon 10:90	50
39	Měření 1: Směrovost Optokon 10:90	51
40	Měření 30: Směrovost Optokon 10:90	51
41	Vložený útlum Optokon 1:99	52
42	Vložený útlum Optokon 1:99	52
43	Měření 1: Směrovost Optokon 1:99	53
44	Měření 30: Směrovost Optokon 1:99	53
45	Měření 1: Vložený útlum Optokon 50:50	54
46	Měření 30: Vložený útlum Optokon 50:50	54
47	Měření 1: Dělicí poměr Optokon 50:50	55
48	Měření 30: Dělicí poměr Optokon 50:50	55
49	Měření 1: Celkové ztráty Optokon 50:50	56
50	Měření 30: Celkové ztráty Optokon 50:50	56
51	Měření 1: Homogenita útlumu Optokon 50:50	57
52	Měření 30: Homogenita útlumu Optokon 50:50	57
53	Měření 1: Směrovost Optokon 50:50	58
54	Měření 30: Směrovost Optokon 50:50	58

1 Úvod

S rostoucími nároky na kvalitu poskytovaných služeb a cenou provozu datového připojení, roste i míra preference užití optických sítí pro zajištění datového připojení domácností či firem. Bez sporu největší využití optických sítí nalezneme v problematice propojení dvou bodů na delší vzdálenost, jako tomu může být v případě propojení městských částí, měst jako takových či států. Optické sítě se dále využívají pro propojení celých kontinentů například pomocí podmořských kabelů.

Optické sítě vynikají především možnostmi přenášet datový signál na velkou vzdálenost, bez užití zesilovače, jako je tomu například u sítí s užitím metalického vedení. Dále vynikají svou spolehlivostí a přenosovou rychlostí. Optické sítě dělíme na dva druhy, aktivní a pasivní.

Aktivní optickou sítí rozumíme síť, která pro svůj provoz využívá nejméně jeden aktivní prvek, jako je například zesilovač optického signálu či aktivní rozbočovač. Oproti pasivním optickým sítím nám umožňují překlenout větší vzdálenost. Nevýhodou jsou však náklady na budování sítě a následný provoz.

Pasivní optickou sítí rozumíme síť, která pro svůj provoz využívá jen pasivních prvků, jako je například optické vlákno, konektor či pasivní optický rozbočovač.

Jelikož každý prvek pasivních optických sítí čelí různým vlivům, které jej degradují a způsobují následnou změnu jeho útlumových parametrů, se budu ve své bakalářské práci zabývat prvkem spadajícím do pasivních optických sítí, konkrétně optickým couplerem. Cílem mé práce bude zjistit vliv tepelného namáhání optických couplerů. Zkoumanými parametry budou vložený útlum, dělicí poměr, celkové ztráty, homogenita útlumu a směrovost. Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. První část je teoretická, kde jsem provedl teoretický rozbor optického coupleru a jeho parametrů, popis zatěžování optických couplerů teplotním namáháním a popis měření útlumových parametrů optických couplerů. Druhou částí je již praktické měření a vyhodnocení naměřených hodnot.

2 Teoretický rozbor optického coupleru a jeho parametrů

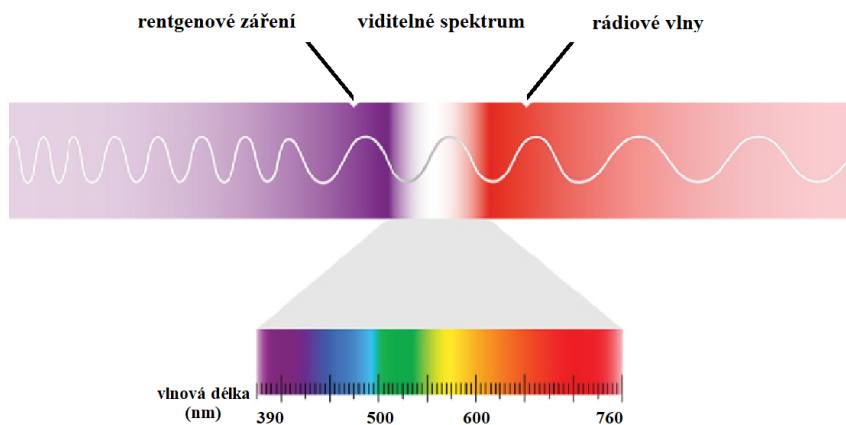
Tato kapitola pojednává o základních informacích souvisejících s optickým couplerem. V první části jsou uvedeny základní informace o světle, následují typy optických vláken, zdroje záření, Optické přístupové sítě a optické přípojky. Kapitola je ukončena teoretickým rozбором optického coupleru.

2.1 Světlo

Jedná se o část elektromagnetického záření, kde elektromagnetické záření chápeme jako příčné vlnění elektromagnetického pole. Toto záření je charakterizováno různou vlnovou délkou a rychlostí šíření.

Rychlost světla je ovlivněna prostředím, ve kterém se pohybuje. Ve vakuu tato rychlost činí $c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Vlnovou délkou označujeme 1 periodu vlny, vzdálenost, po kterou se vlna opakuje. Označujeme ji písmenem λ lambda.

Na základě vlnové délky jsme schopni odlišit elektromagnetické spektrum viditelného a neviditelného světla. Viditelnému spektru světla náleží rozsah vlnové délky 390 - 760 nm. V tomto rozsahu je světlo pozorovatelné lidským okem. Menší vlnové délky světla nazýváme ultrafialové záření, větší vlnové délky pak infračerveným zářením. Na obrázku č. 1 je toto světelné spektrum znázorněno.



Obrázek 1: Světelné spektrum

V optických komunikacích se využívají spektra infračerveného záření. Konkrétní spektra jsou určeny na základě útlumové charakteristiky optických vláken. Tato konkrétní spektra nazýváme okna. [5,8]

2.2 Optická vlákna

Optická vlákna představují základní prvek optických sítí. Díky těmto vláknům jsme schopni přenášet informace v podobě světelného paprsku.

Materiál, ze kterého se optická vlákna vyrábí, je spjat s užitím vlákna. Hlavním materiálem pro výrobu skleněných optických vláken je křemík, pro plastová vlákna akryl. Hlavní výhodou skleněných optických vláken je nízký útlum. Mnohovidová plastová optická vlákna běžně dosahují útlum 50 až 100 dB/Km, zatímco u vláken vyrobených z křemičitého skla se útlum pohybuje okolo 1 dB/Km.

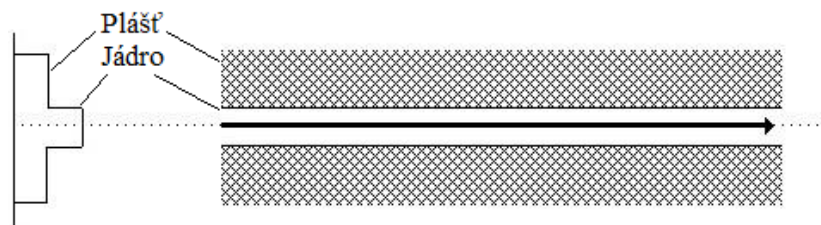
Z toho vyplývá, že skleněná optická vlákna se užívají pro přenos optického signálu na větší vzdálenost, zatímco plastová optická vlákna na vzdálenosti kratší. [2,4]

2.3 Jednovidová optická vlákna

Jedná se o druh optického vlákna, u kterého se přenáší jen jeden optický signál. Signál v takovémto vlákně je tedy tvořen jedním videm, který se šíří podél osy jádra pomocí totálního odrazu na rozhraní jádra a pláště vlákna (skokovou změnou indexu lomu).

Průměr jádra takového vlákna je 8-10 μm a pláště 125 μm . Útlum se pohybuje od 0,35dB/km do 0,2dB/km při vlnových délkách 1310nm a 1550nm.

Díky nízkému útlumu a vysoké přenosové rychlosti jsou jednovidová vlákna užívána především pro propojení dvou bodů na velkou vzdálenost (např. měst či států). Jednovidová vlákna jsou dražší a to z důvodu užití kvalitnějšího zdroje světla a detektoru a také díky technologii výroby samotného vlákna. Příklad jednovidového optického vlákna je uveden na obrázku č. 2. [2][4]

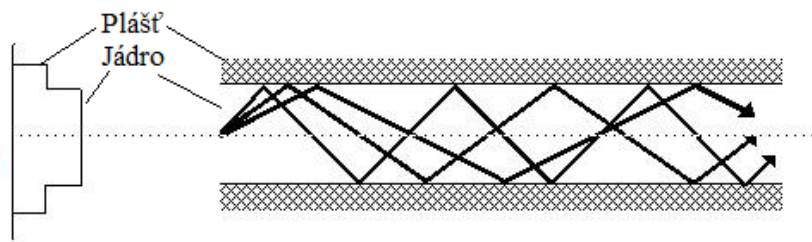


Obrázek 2: Jednovidové optické vlákno

2.4 Mnohovidová optická vlákna

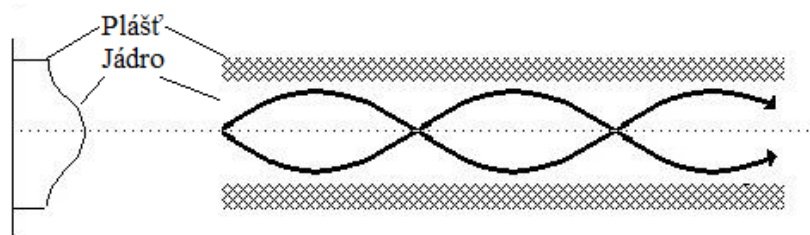
Jedná se o druh optického vlákna, kde se přenáší více optických signálů současně. Pro mnohovidová vlákna se používá průměr jádra 50-62,5 μm a pláště 125 μm . Signál se ve vláknu šíří dvěma způsoby. Buď za pomoci skokové změny indexu lomu nebo gradientní změnou indexu lomu.

Vlákna se skokovou změnou indexu lomu dosahují většího útlumu než vlákna s gradientní změnou indexu lomu. Útlum se pohybuje od 2,6 do 50dB/km. To je způsobeno především díky vidové disperzi, při které dochází k roztažení pulzu v čase, viz obrázek č. 3. Na detektor dopadají jednotlivé paprsky v různých časových okamžicích, to je způsobeno tím, že jednotlivé paprsky opisují různé dlouhé trasy. Z tohoto důvodu se tato vlákna užívají pro přenos signálu na malé vzdálenosti do 2km.



Obrázek 3: Mnohovidové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu

U gradientních vláken dochází k plynulé změně indexu lomu. Čím dále se přenášený paprsek nachází od středu jádra, tím menší je index lomu a paprsek se vrací zpět do středu jádra. Tímto se snižuje vznik vidové disperze a jednotlivé paprsky urazí přibližně stejnou vzdálenost od zdroje k detektoru. Útlum u gradientních vláken se pohybuje od 2 do 10dB/km při vlnové délce 850nm. Příklad takového jádra je uveden na obrázku č. 4. [1,2,4]



Obrázek 4: Mnohovidové optické vlákno s plynulou změnou indexu lomu

2.5 Zdroje záření

Aby bylo optické vlákno schopné přenášet signál, je nutné zajistit zdroj optického záření. Tento zdroj vyprodukuje světelný paprsek, ten se po namodelování stává nositelem informace. V optických sítích však nelze využít libovolný zdroj záření. Některé zdroje mají příliš nízkou účinnost konverze elektrické energie na světlo, případně jsou příliš velké nebo vyzařují nevhodnou vlnovou délku. Na zdroj optického záření v optických sítích jsou kladeny jisté požadavky.

Obecné požadavky pro zdroj optického záření

- vysoká účinnost - změna elektrické energie na energii světelnou
- dlouhá životnost
- spolehlivost
- úzká spektrální čára
- vhodná vlnová délka
- vysoká směrovost
- malé rozměry
- cena

Na základě výše zmíněných požadavků, užíváme v optických sítích laserové diody či LED diody.

LED diody - skládají se z PN přechodu. LED diody jsou zdrojem nekoherentního záření kdy výsledný paprsek má rozdílné vlnové délky. Největší výhodou tohoto zdroje záření je nízká cena, vysoká účinnost, malé rozměry a dlouhá životnost. Nevýhodou je zejména výše zmíněné generování nekoherentního záření, široká směrová charakteristika a nižší přenosová rychlost pohybující se v řádu stovek Mb/s. [6,8]

Laserové diody - fungují na principu stimulované emise. Základním stavebním prvkem laserové diody je rezonátor. Výhodou laserové diody je generování koherentního záření, díky kterému má paprsek úzkou směrovou charakteristiku a vysoká přenosová rychlost pohybující se v řádu Tb/s. Laserová dioda nám umožňuje komunikovat na velké vzdálenosti, však nevýhodou je vyšší pořizovací cena a kratší životnost ve srovnání s LED. [5,8]

2.6 Optická přístupová síť

Optické přístupové sítě představují síťovou infrastrukturu propojující jednotlivé koncové body za užití prvků optických sítí. Nalezneme zde vše, od užitého zařízení až po samotné medium, po kterém přenášíme optický signál.

Samotná funkcionalita optických sítí spočívá v převedení elektrického signálu na optický užitím optického zdroje, přenosem tohoto optického signálu optickou sítí a následné přijetí optického signálu na přijímači, potažmo detektoru, který tento signál převede zpět na elektrický.

Optické sítě můžeme rozdělit do jistých skupin. Nejprve můžeme optické sítě rozdělit na základě použité vlnové délky, zda pracuje ve viditelné či neviditelné oblasti, nebo na základě přenosového média na vláknové a směrové. Dále se dají optické sítě dělit na základě sdílení prostředku na sítě bod-bod (point-to-point) či mnohobodové sítě (point-to-multipoint).

Z jakých optických prvků je naše síť složena, nám určuje i druh sítě jako takové. Můžeme mít optickou síť složenou čistě z pasivních optických prvků nebo síť, která aktivní prvky obsahuje. Obsahovat může například přepínač.[15]

2.7 Aktivní optická síť (AON)

Jak už název napovídá, aktivní přístupová síť (dále jen AOP - active optical network) se vyznačuje užitím aktivních prvků ve své infrastruktuře.

AON oproti pasivní optické síti (dále jen PON - passive optical network) dovede překlenou větší vzdálenost dosahující až 80 km a to od poskytovatele služeb ke koncovému uživateli.

Díky aktivním prvkům sítě ethernet, je AON schopna managementu (správě) provozu. Tato skutečnost nám usnadňuje distribuci připojení například v hustě osídlených oblastech jako je například panelová zástavba města. Zde je možné snadněji zajistit jednotlivým účastníkům jejich nasmlouvané parametry připojení a to především díky snadnější izolaci poruchy v síti, kdy můžeme automaticky přepnout na redundantní síťové připojení.

AON na rozdíl od PON dále dosahuje podstatně větších dosahů, tím rozumějme vzdálenost kterou je schopna překlenout mezi dvěma body. Toho jsme schopni dosáhnout díky optickému opakovači.[15]

Výhody

- větší překlenutá vzdálenost
- aktivní prvky sítě ethernet
- symetrický kanál
- upstream/downstream
- transparentnost
- jednoduchost provedení upgrade technologie

Nevýhody

- z nutnosti napájení aktivních prvků spjaté výdaje za energie
- potenciaální problém s hledáním vhodného umístění aktivních prvků
- větší množství spojek a konektorů

2.8 Pasivní optická síť (PON)

Pro své nízké provozní náklady a vysokou spolehlivost, jsou PON snad nejvýznamnějším směrem, pro realizaci propojení koncových uživatelů. Pasivní optická síť se skládá výhradně z prvků, které pro svůj provoz nepotřebují zdroj napájení. Díky tomu je samotná realizace pasivní optické sítě značně jednodušší, než je tomu u optických sítí aktivních. Není třeba zajišťovat dodatečné přivedené elektrického proudu k aktivním prvkům optické sítě nebo výdaje spjaté za provoz takové sítě. V PON sítích nalezneme prvky, jako jsou například optické splitters, optické couplery a jednotlivá média, která nám zajišťují propojení těchto prvků.[3,9,14,15]

PON sítě můžeme rozdělit do několika základních prvků:

- ODN - Optical Distribution Network
Jedná se o optickou distribuční síť. Ta obsahuje prvky, potřebné pro přenos dat mezi jednotlivými síťovými zakončeními.
- OAN - Optical Access Network
Jedná se o optickou přístupovou síť. OAN zajišťuje veškerou síťovou distribuční infrastrukturu. Obsahuje jednotlivé optické distribuční sítě připojené k centrálnímu uzlu.
- OLT - Optical Line Termination
Je to optické linkové zakončení. Jedná se komponent, sloužící k ukončení linky ze stran poskytovatele. Rozumějme jako zakončení ODN ze stran poskytovatele připojení.

- **ONT - Optical Network Termination**

Optické síťové zakončení je komponent, který zprostředkovává funkce účastnického rozhraní mezi koncovými zařízeními účastníků a přístupovou sítí. Primární funkce tohoto komponentu je přizpůsobit komunikační protokoly pro komunikaci rozhraní a sítě PON. Zjednodušeně se dá hovořit o opticko-metalickém konvertoru.

- **ONU - Optical Network Unit**

Jedná se o optickou síťovou jednotku, která zajišťuje zakončení PON sítě na straně uživatele. Ve své podstatě poskytuje obdobnou funkci jako je tomu u ONT, avšak toto zařízení zprostředkovává následné připojení jako bezdrátovou či metalickou síť.

2.9 Optické přípojky FTTx

Optické přípojky FTTx nám obecně určují bod, do kterého je přivedeno optické vlákno. Na základě užití varianty přípojky jsme schopni říct, zda je optické vlákno přivedeno k bytové jednotce, budově či například k sídlišti.[15]

Varianty optických přípojek FTTx:

- **FTTB - Fiber To The Building**

Nejčastější varianta připojení například panelových domů. Optické vlákno přístupové sítě je přivedeno obvykle do suterénu bytového domu, kde se nachází přípojná skříň. Připojení uživatelů k přípojně skříně se provádí například metalickým vedením.

- **FTTH - Fiber To The Home**

Jedná se o přivedení optického vlákna přístupové sítě až k bytové jednotce samotného uživatele.

- **FTTO - Fiber To The Office**

Optické vlákno přístupové sítě je přivedeno ke kanceláři či firemnímu prostoru.

- **FTTP - Fiber To The Premises**

Touto variantou jsou souhrnně označovány varianty FTTH a FTTO.

- **FTTC - Fiber To The Curb**

Jedná se o variantu, kdy je optické vlákno přístupové sítě zakončeno na sídlišti. Obvykle je optická síťová jednotka instalována do venkovního rozvaděče. Vzdálenost od koncového uživatele je přibližně 100 - 300 m.

- **FTTN - Fiber To The Node**

Jedná se o další variantu, při které se posouvá bod zakončení optické přístupové sítě dál od uživatele.

- FTTE_x - Fiber To The Exchange

Jedná se o ukončení optického vlákna přístupové sítě u ústředny.

2.10 Optický coupler

Optický coupler je prvek optických sítí, který nevyžaduje zdroj napájení. Jeho funkcí je rozdělit optický výkon do více optických vláken nebo jej naopak spojit z více vláken do vlákna jednoho. Couplery můžeme rozdělit do skupin na základě typu či postupu výroby.[3,9,10,11,12,13]

Typy optických couplerů

Ccoupler typu Y

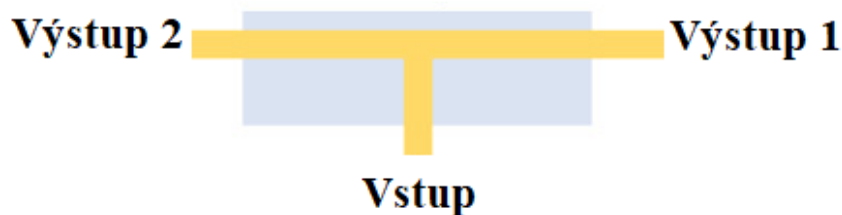
- Jedná se o coupler připomínající písmeno Y. Jeho vstupní signál se rovnoměrně dělí na dva výstupní.



Obrázek 5: Coupler typu Y

Coupler typu T

- Jedná se o coupler připomínající písmeno T. U tohoto coupleru dochází k nerovnoměrnému rozdělení vstupního výkonu na jednotlivé výstupy. Jedná se o asymetrické dělení vstupního výkonu.



Obrázek 6: Coupler typu T

Coupler 2x2

- Jedná se o coupler připomínající písmeno X. Tento druh coupleru spojuje optický výkon ze dvou vstupních vláken a následně jej rozdělí na dvě výstupní vlákna



Obrázek 7: Coupler typu 2x2

Coupler typu hvězda

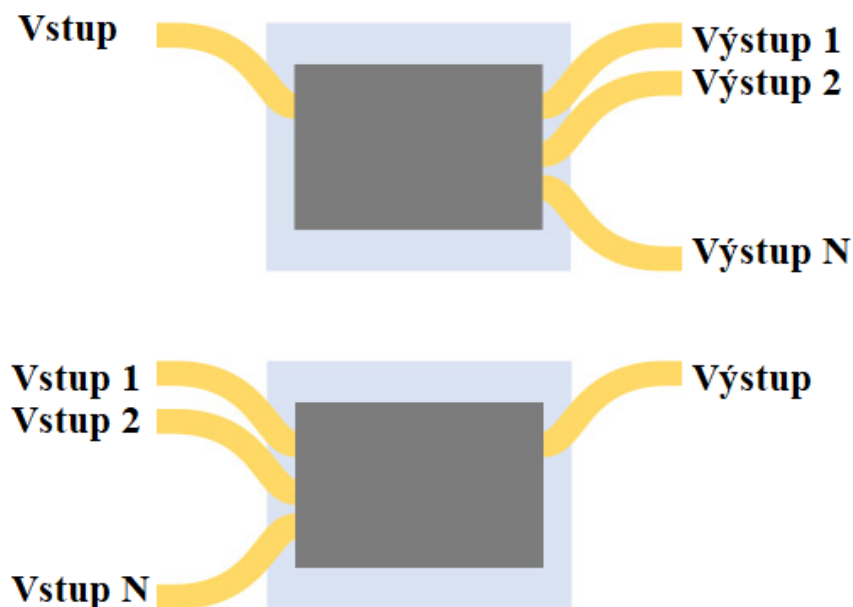
- Tento coupler připomínající hvězdu rozděluje vstupní signál ze dvou či více vstupů na dva či více výstupů.



Obrázek 8: Coupler typu hvězda

Coupler typu strom

- Coupler připomínající větvení stromu. Tento coupler umožňuje rozdělit signál z jednoho vstupu na více výstupů. Další možnost využití je v opačném zapojení, kdy spojuje výkon z více jak dvou vstupů do jednoho výstupu.



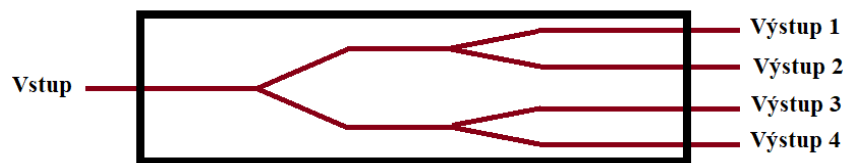
Obrázek 9: Coupler typu strom

Postup výroby

Výrobu optických couplerů realizujeme metodou PLC (Planar Lightwave Circuit) nebo metodou FBT (Fused Bionic Taper).

PLC (Planar Lightwave Circuit)

Coupler vyráběn touto technologií nabízí lepší řešení v případech, kdy klademe specifické nároky na jeho konfiguraci. Tyto couplery jsou vyráběny planární technologií, kdy dochází k vytvoření požadované struktury na křemíkové destičce. Díky tomuto postupu zajistíme, že PLC caouplery dosahují velmi přesného dělení optického výkonu ze vstupu na výstupy a zajištěním minimální ztráty výkonu.



Obrázek 10: Znázornění PLC coupleru

S rostoucími nároky na optickou síť, vzrostl nárok na parametry optických couplerů. Díky menším ztrátám a zajištění přesné struktury jsou PLC couplery ideálním řešením pro nasazení v přístupových sítích.



Obrázek 11: PLC coupler

FBT (Fused Bionic Taper)

FBT couplery se vyrábějí starší technologií. Při postupu výroby dochází ke spojení více optických vláken v konkrétním bodě. Tento postup můžeme rozdělit do několika bodů.[15]

Odstranění pláště a ochrany

- Nejprve odstraníme části pláště a ochrany u jednotlivých vláken.

Stočení

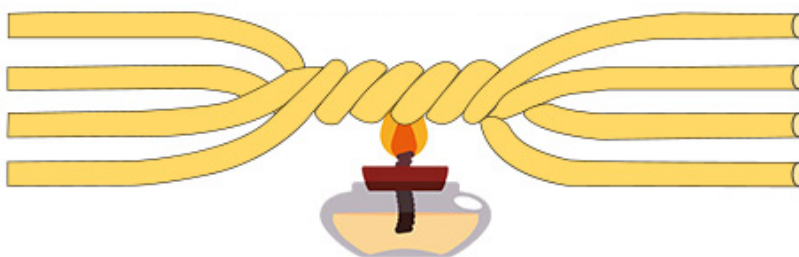
- Vlákna vzájemně stočíme.



Obrázek 12: stočení vláken

Teplota a tlak

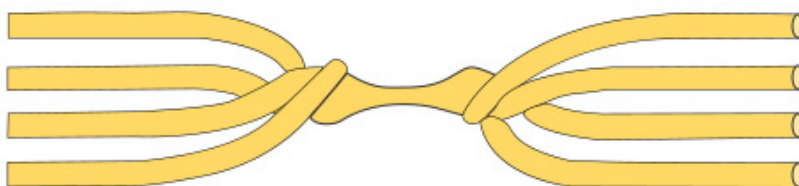
- Působením vysoké teploty a tlaku dojde ke svaření jednotlivých vláken.



Obrázek 13: působení teploty

Tah

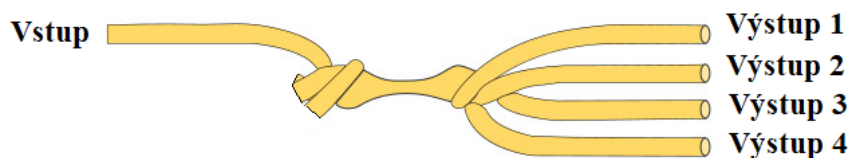
- Vyvinutím tahu na vláknech dojde k zúžení v bodě svaru.



Obrázek 14: působení tahu

Finální úprava

- Následně dojde k odstranění přebytečných vstupů. Tímto dostaneme požadovanou strukturu coupleru.



Obrázek 15: úprava na požadovanou strukturu

Parametry optických couplerů

Každý optický coupler obsahuje soubor parametrů, které popisují jeho fyzikální vlastnosti. Dále se seznámíme s jednotlivými parametry.

Rozbočovací poměr

- Na základě rozbočovacího poměru jsme schopni určit, kolik má dany coupler výstupů. Nejčastěji jsou užívány poměry 1:2, 1:4, 1:8, 1:16 či 1:32, méně často pak 1:64 či 1:128.

Dělicí poměr

- Coupler dělí vstupní výkon na jednotlivé výstupy. Jelikož v optických sítích užíváme couplery se symetrickým či asymetrickým dělicím poměrem, tento parametr nám určuje, v jakém poměru budou výkony jednotlivých výstupů. Jako symetrický považujeme například u coupleru 1:2 dělicí poměr 50% – 50%. Jako asymetrický by byl u tohoto coupleru například poměr 10% – 90% kdy bychom na jednom výstupu naměřili jen 10% ze vstupního výkonu a na druhém výstupu bychom naměřili 90%

Vložný útlum

- U couplerů dochází k rozdělení vstupního výkonu na jednotlivé výstupy. Toto rozložení výkonu je hlavním zdrojem útlumu v optických sítích a nazýváme jej vložný útlum. Vložný útlum se odvíjí na základě rozbočovacího a dělicího poměru. Vzorec pro výpočet vloženého útlumu je uveden rovnicí č. (1).

$$-10 * \log \frac{P_{vyst}}{P_0} \quad (1)$$

Směrovost

- Jinak řečeno, se jedná o útlum přeslechu. Tento útlum přeslechu nám určuje, jak velký výkon přechází z mezi kanály. Tento přechod mezi kanály však není žádoucí, proto by měl být útlum pokud možno co nejvyšší. Měření směrovosti se provádí pro všechny kombinace výstupů, tím lze lokalizovat případný problém. Směrovost je uváděna v dB. Vzorec pro výpočet je uveden v rovnici č. (2).[15]

$$-10 * \log \frac{P_{1,2}}{P_0} \quad (2)$$

Homogenita ztrát

- Jedná se o hodnotu, získanou rozdílem maximálního vloženého útlumu a minimálního vloženého útlumu. Homogenita ztrát je udávána v dB. Vzorec pro výpočet je uveden v rovnici č. (3).

$$MAX_{vloženýútlum1-2} - MIN_{vloženýútlum1-2} \quad (3)$$

Celkové ztráty

- Díky tomuto parametru jsme schopni určit, jaké ztráty způsobuje konkrétní optický coupler. Vzorec pro výpočet je uveden v rovnici č. (4).[7]

$$-10 * \log \frac{P_1 + P_2}{P_0} \quad (4)$$

3 Popis zatěžování optických couplerů teplotním namáháním

Zatěžování optických couplerů tepelným namáháním a samotné měření sledovaných parametrů bylo realizováno v optické laboratoři, která se nachází v budově N areálu VSB-TUO. Tepelné namáhání optických couplerů jsem zajistil tak, že se jednotlivé couplery vložili do elektronické pece. Do této elektronické pece byl přiveden i tepelný senzor, díky kterého jsem byl schopen korigovat optimální tepelné zatížení.

Optické couplery byli namáhány teplotou, přesahující 90 stupňů celsia. S vedoucím mé bakalářské práce jsme se dohodli, že teplota bude ustálena na hodnotě 100 stupňů celsia. Po týdnu postupného zvyšování teploty z 95 stupňů se mi podařilo nalézt optimální nastavení elektrické pece, pro udržení námi zvolené teploty. Pro zajištění rovnoměrného namáhání optických couplerů byla teplota v elektronické peci monitorována po celou dobu měření.

Pro objektivnost mé bakalářské práce, byli zvoleny couplery tří dělicích poměrů od dvou výrobců při rozbočovacím poměru 1:2. Prvním výrobcem byla tuzemská společnost Optokon a druhým výrobcem byla zvolena zahraniční společnost Gezhi. Couplery byli zvoleny s dělicími poměry 10:90, 1:99 a 50:50. V elektrické peci jsem tedy zatěžoval celkem 6 couplerů.

4 Popis měření útlumových parametrů optických couplerů

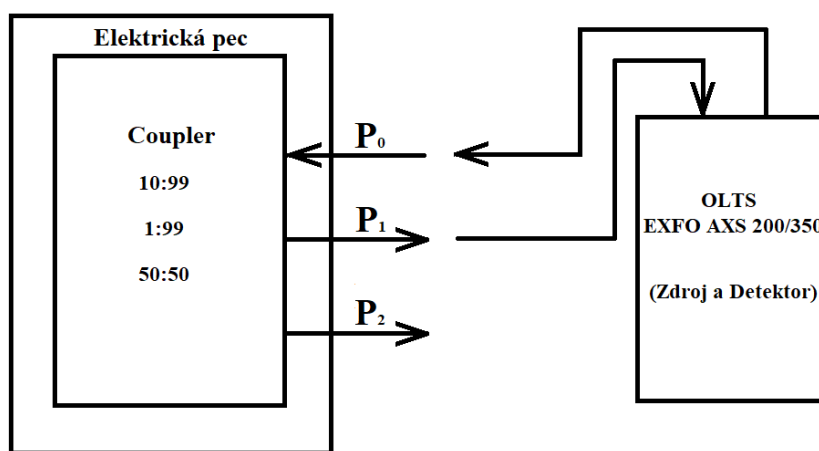
Pro zajištění statistického záznamu měření sledovaných parametrů optického coupleru bylo nutné, aby se měření provádělo pravidelně v odpovídajících intervalech. Interval měření byl nastaven na dobu jednoho týdne. Dále bylo nutné určit délku trvání tohoto měření. S vedoucím mé bakalářské práce jsme stanovili délku měření na dobu 30 týdnů. V mé bakalářské práci je tedy zaznamenán vliv tepelného namáhání na jednotlivé sledované parametry optického coupleru, po dobu trvání 30-ti týdnů.

První měření optických couplerů proběhlo dne 10. 5. 2017. Jelikož toto první měření proběhlo ve středu, bylo každé další měření prováděno taktéž ve středu. Do laboratoře jsem se snažil docházet před samotnou výukou. Z tohoto důvodu probíhalo měření přibližně od 6 do 9 hodin rána. Poslední měření sledovaných parametrů optických couplerů proběhlo dne 29. 11. 2017.

Samotné měření je znázorněno na obrázku č. 14. Kde P_0 nám představuje vstup optického coupleru, P_1 a P_2 jsou výstupy. Samotné optické couplery byly vloženy do elektrické pece, ze které byly vyvedeny jen vstupy a výstupy samotných optických couplerů.

Měření výkonu probíhalo propojením zdroje se vstupem coupleru P_0 a detektorem s výstupem P_1 a následně výstupem P_2 .

Měření směrovosti bylo prováděno mezi výstupy, tedy zdroj bylo nutno propojit s P_1 a detektor s P_2 .

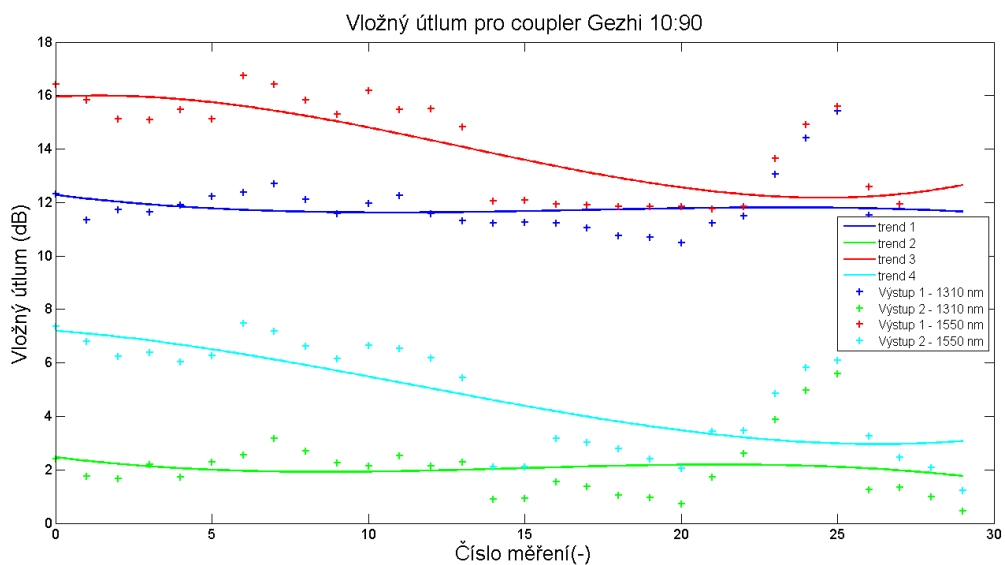


Obrázek 16: Schéma měření výkonu

5 Měření a vyhodnocení charakteristik optických couplerů

V této kapitole budou uvedeny jednotlivé grafy, popisující sledované parametry optických couplerů. Jednotlivé grafy obsahují konkrétní sledovaný parametry daného optického coupleru v rozsahu celé délky měření. V grafu je vždy znázorněno měření pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. Při ose X je zaneseno číslo prováděného měření, při ose Y je zanesena úroveň sledovaného parametru až na dělicí poměr v jednotce dB. Úroveň dělicího poměru je zanesena v %. Průběhy jednotlivých grafů jsou následně popsány a vyhodnoceny.

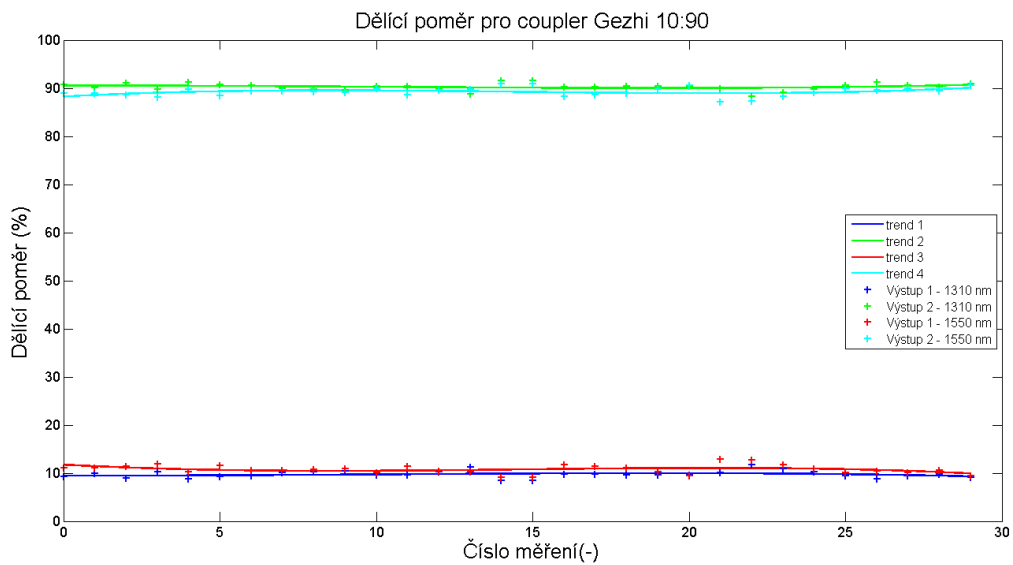
5.1 Gezhi 10:90



Obrázek 17: Vložený útlum: Gezhi 10:90

V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty vloženého útlumu při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Pro vlnovou délku 1310 nm můžeme v grafu pozorovat poměrně ustálené hodnoty homogenity útlumu. Pro vlnovou délku 1550 nm však můžeme pozorovat skokové zvýšení měřených hodnot které nastalo po 5 týdnech měření.

Měření 1		Měření 30	
Tabulka 1: Vložený útlum Gezhi 10x90		Tabulka 2: Vložený útlum Gezhi 10x90	
Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)	Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	12.33	Výstup 1, 1310nm	10.47
Výstup 1, 1550nm	16.42	Výstup 1, 1550nm	11.03
Výstup 2, 1310nm	2.39	Výstup 2, 1310nm	0.46
Výstup 2, 1550nm	7.35	Výstup 2, 1550nm	1.22



Obrázek 18: Dělicí poměr: Gezhi 10:90

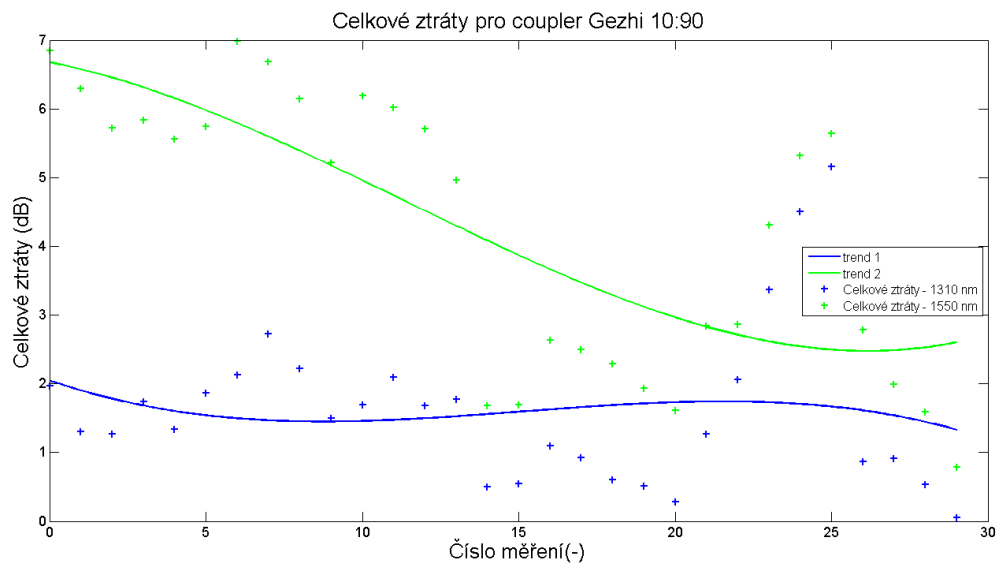
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty dělicího poměru při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu je patrné, že se hodnoty dělicího poměru v průběhu měření příliš nemění. Z toho lze usuzovat, že tepelné namáhání nemělo zásadní vliv na dělicí poměr u tohoto coupleru.

Tabulka 3: Měření 1: Dělicí poměr Gezhi 10:90

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (%)
Výstup 1, 1310nm	9.22
Výstup 1, 1550nm	11.07
Výstup 2, 1310nm	90.78
Výstup 2, 1550nm	88.93

Tabulka 4: Měření 30: Dělicí poměr Gezhi 10:90

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	9.06
Výstup 1, 1550nm	9.47
Výstup 2, 1310nm	90.94
Výstup 2, 1550nm	90.53



Obrázek 19: Celkové ztráty: Gezhi 10:90

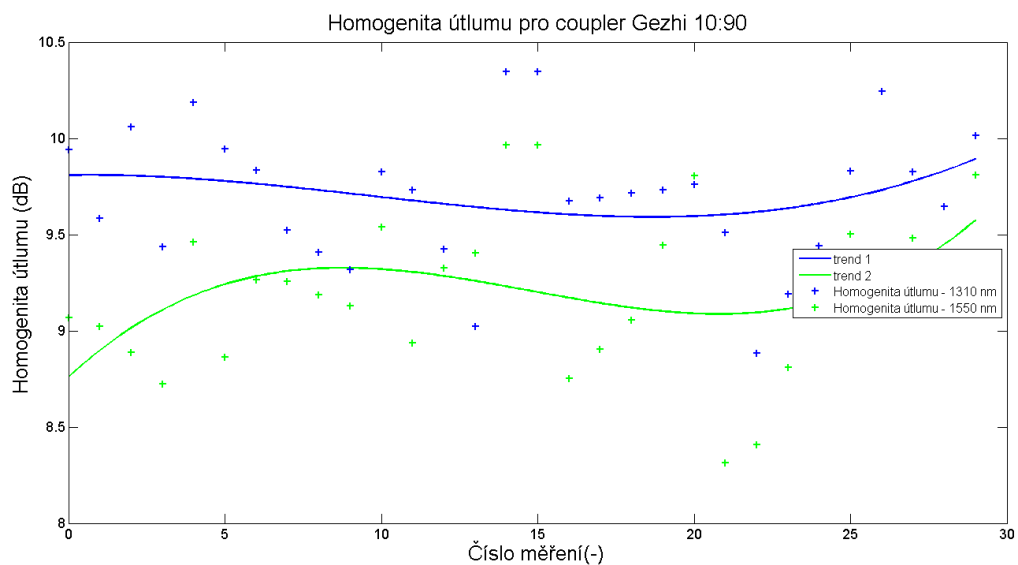
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty celkových ztrát při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu pozorujeme, že v průběhu měření došlo k výraznému poklesu celkových ztrát pro vlnovou délku 1550 nm. Pro vlnovou délku 1310 nm byl také zaznamenán pokles celkových ztrát, ne však tak razantní.

Tabulka 5: Měření 1: Celkové ztráty Gezhi 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	1.97
1550nm	6.84

Tabulka 6: Měření 30: Celkové ztráty Gezhi 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	0.05
1550nm	0.79



Obrázek 20: Homogenita útlumu: Gezhi 10:90

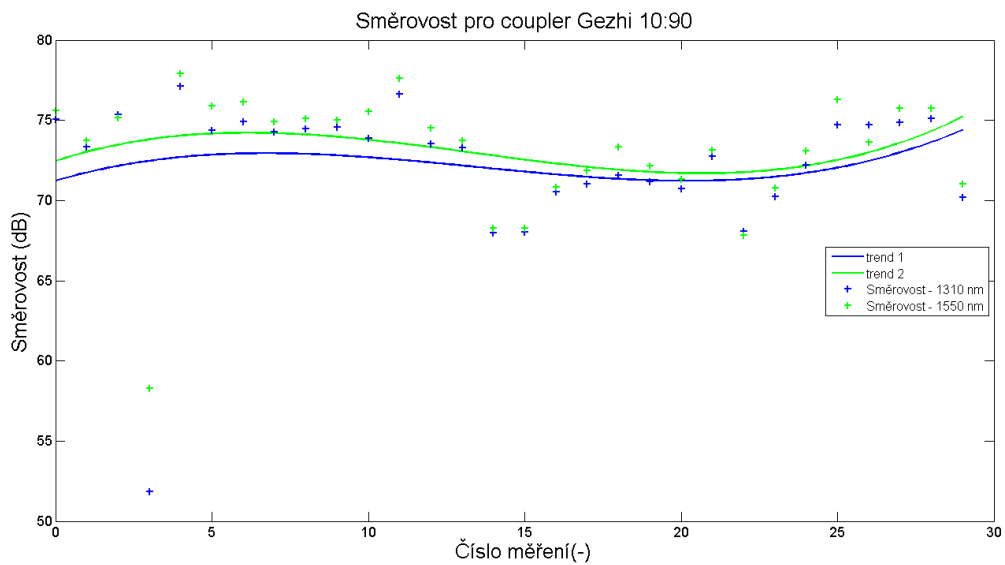
Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu můžeme pozorovat, že pro vlnovou délku 1310 nm byli zaznamenány hodnoty útlumu ve skokových tendencích. Díky aproximaci však můžeme pozorovat mírně klesající trend hodnot, kdy v posledních 5 týdnech došlo ke zvyšování. Pro vlnovou délku 1550 nm můžeme pozorovat nižší naměřené hodnoty v průběhu prvních 5 týdnů. Poté došlo ke zvýšení měřených hodnot.

Tabulka 7: Měření 1: Homogenita útlumu Gezhi 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	9.94
1550nm	9.07

Tabulka 8: Měření 30: Homogenita útlumu Gezhi 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	10.01
1550nm	9.81



Obrázek 21: Směrnost: Gezhi 10:90

Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu je patrné, že se směrnost při prováděných měřeních nedostala pod hodnotu 50 dB. Z tohoto faktu lze usuzovat, že nám coupler poskytoval po celou dobu měření dostatečnou hodnotu přeslechu útlumu. Průměrná hodnota směrnosti pro vlnovou délku 1310 nm byla 72,21 dB a pro vlnovou délku 1550 nm činila 73,08 dB. Na základě naměřených dat usuzuji, že tepelné namáhání tento coupler negativně neovlivnilo.

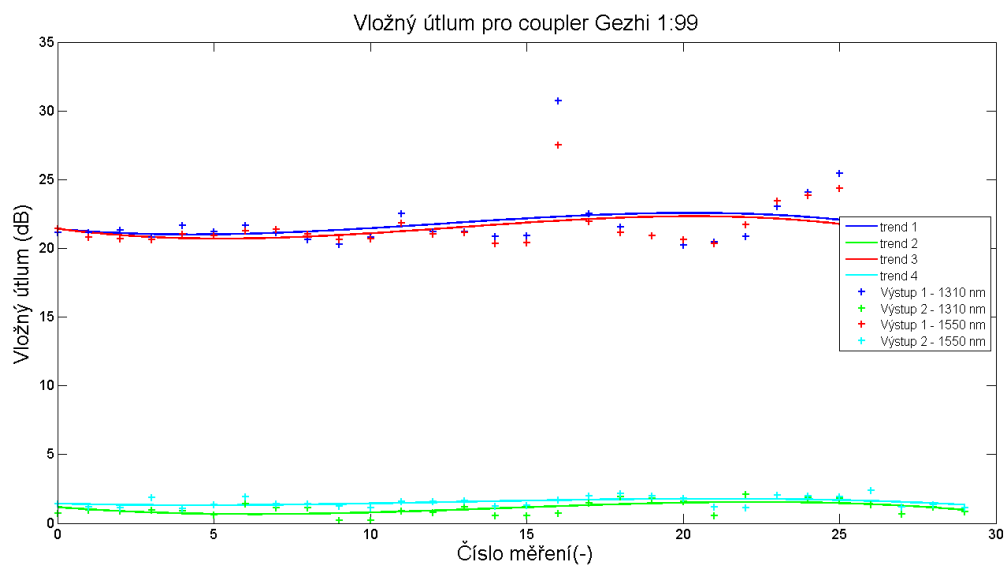
Tabulka 9: Měření 1: Směrnost Gezhi 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	75.04
1550nm	75.6

Tabulka 10: Měření 30: Směrnost Gezhi 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	70.19
1550nm	71.04

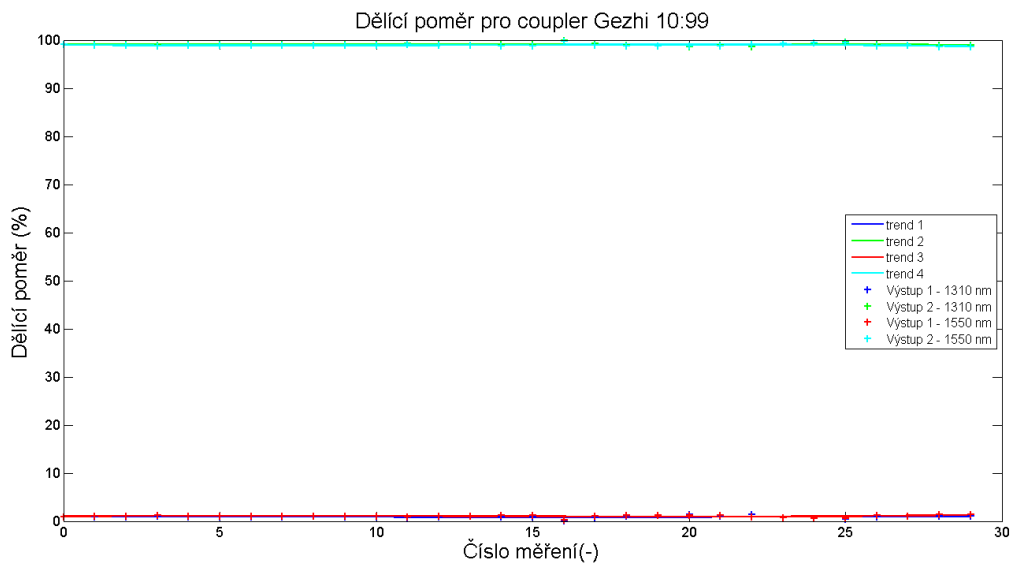
5.2 Gezhi 1:99



Obrázek 22: Vložený útlum: Gezhi 1:99

V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty vloženého útlumu při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu můžeme pozorovat, že pro výstupy č. 2 byl vložený útlum takřka konzistentní. Teprve po 17 měření nám začala hodnota vloženého útlumu kolísat. Oproti tomu hodnota výstupů č. 1, kdy došlo ke kolísání hodnot již po 6 měření, jsem v 17 týdnu měření zaznamenal maximální dosaženou hodnotu vloženého útlumu. Tato hodnota dosahovala 30,74 dB pro vlnovou délku 1310 nm a hodnotu 27,53 pro vlnovou délku 1550 nm.

Měření 1		Měření 30	
Tabulka 11: Vložený útlum Gezhi 1:99		Tabulka 12: Vložený útlum Gezhi 1:99	
Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)	Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	21.13	Výstup 1, 1310nm	20.37
Výstup 1, 1550nm	21.44	Výstup 1, 1550nm	19.4
Výstup 2, 1310nm	0.73	Výstup 2, 1310nm	0.84
Výstup 2, 1550nm	1.38	Výstup 2, 1550nm	1.14



Obrázek 23: Dělicí poměr: Gezhi 1:99

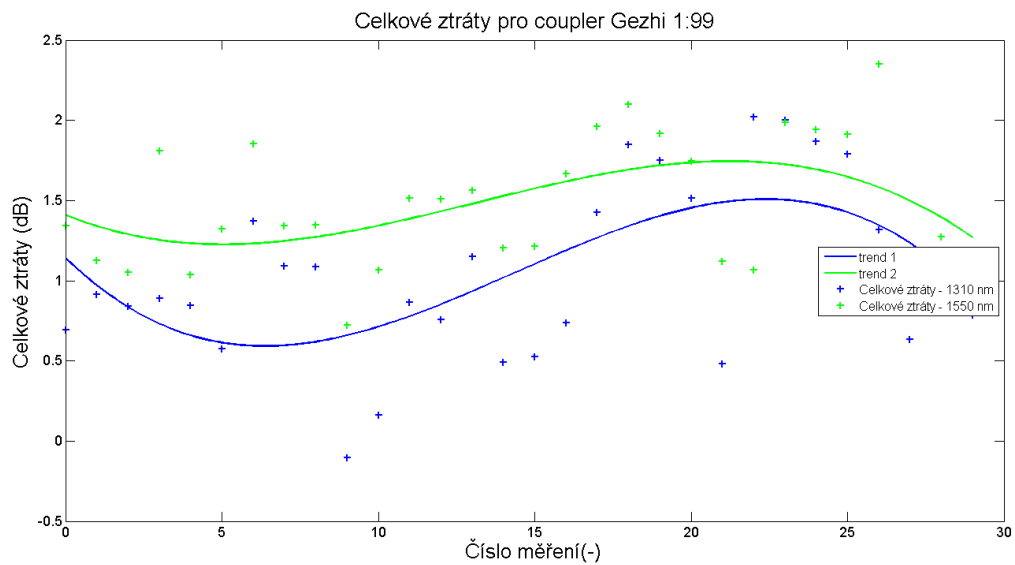
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty dělicího poměru při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu je patrné, že pro coupler výrobce Gezhi s dělicím poměrem 1:99 nemělo tepelné namáhání zásadní dopad na hodnotu dělicího poměru. Naměřené hodnoty se po čas měření výrazně neměnily.

Tabulka 13: Měření 1: Dělicí poměr Gezhi 1:99

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (%)
Výstup 1, 1310nm	0.90
Výstup 1, 1550nm	0.98
Výstup 2, 1310nm	99.1
Výstup 2, 1550nm	99.02

Tabulka 14: Měření 30: Dělicí poměr Gezhi 1:99

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (%)
Výstup 1, 1310nm	1.10
Výstup 1, 1550nm	1.47
Výstup 2, 1310nm	98.9
Výstup 2, 1550nm	98.53



Obrázek 24: Celkové ztráty: Gezhi 1:99

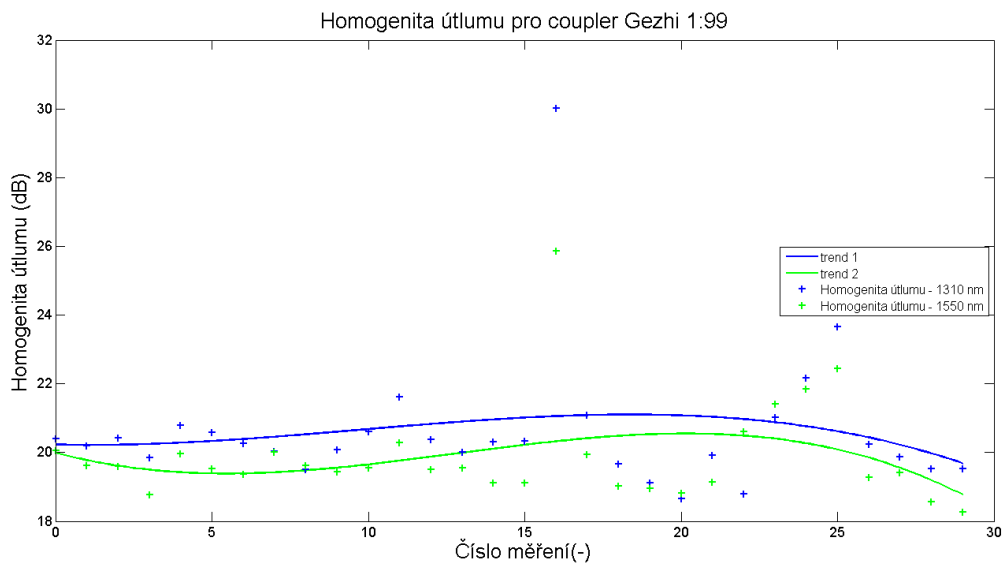
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty celkových ztrát při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Hodnota celkových ztrát byla během měření velice proměnlivá. Nejprve došlo ke snižování této hodnoty pro obě vlnové délky. Po dosažení 5 měření začaly hodnoty stoupat. Po 25 měření došlo opět k poklesu celkových ztrát.

Tabulka 15: Měření 1: Celkové ztráty Gezhi 1:99

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	0.69
1550nm	1.34

Tabulka 16: Měření 30: Celkové ztráty Gezhi 1:99

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	0.79
1550nm	1.08



Obrázek 25: Homogenita útlumu: Gezhi 1:99

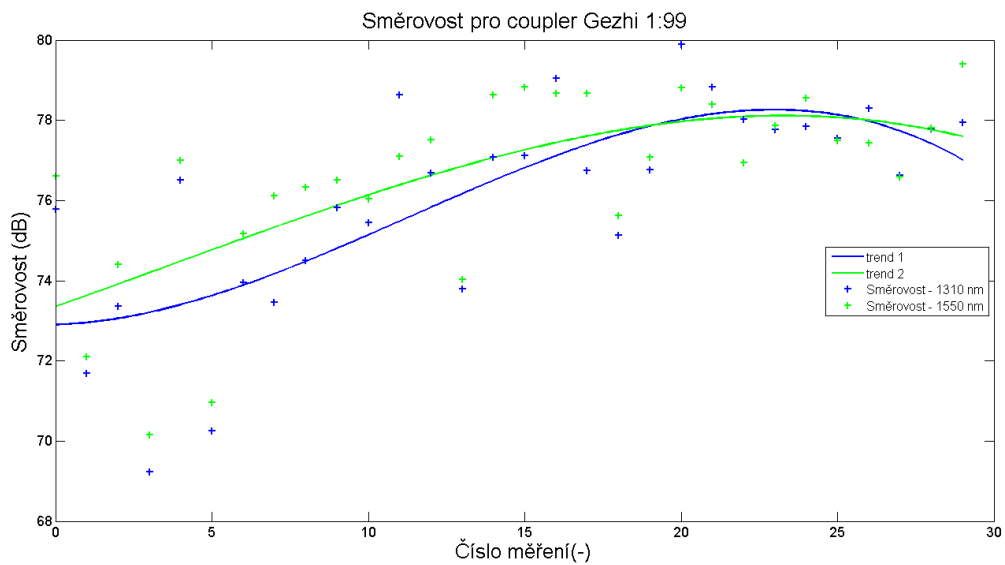
Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu můžeme pozorovat, že se hodnoty homogenity útlumu během měření příliš neměnily. Průměrná hodnota pro vlnovou délku 1310 nm byla 20,62 dB a pro vlnovou délku 1550 nm činila 19,89 dB. K výrazným změnám došlo až po 20 týdnech měření, kdy došlo nejprve k růstu zaznamenaných hodnot a posléze skokovému poklesu.

Tabulka 17: Měření 1: Homogenita útlumu Gezhi 1:99

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	20.40
1550nm	20.05

Tabulka 18: Měření 30: Homogenita útlumu Gezhi 1:99

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	19.53
1550nm	18.26



Obrázek 26: Směrnost: Gezhi 1:99

Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu vidíme plynulý nárůst hodnoty směrovosti. Pro vlnovou délku 1310 nm byla hodnota posledního měření zvýšena o 2,17 dB oproti prvnímu měření. Pro vlnovou délku 1550 nm bylo zaznamenáno zvýšení směrovosti o 2,79 dB. Z naměřených dat lze usuzovat, že tepelné namáhání pozitivně ovlivnilo hodnoty směrovosti tohoto coupleru.

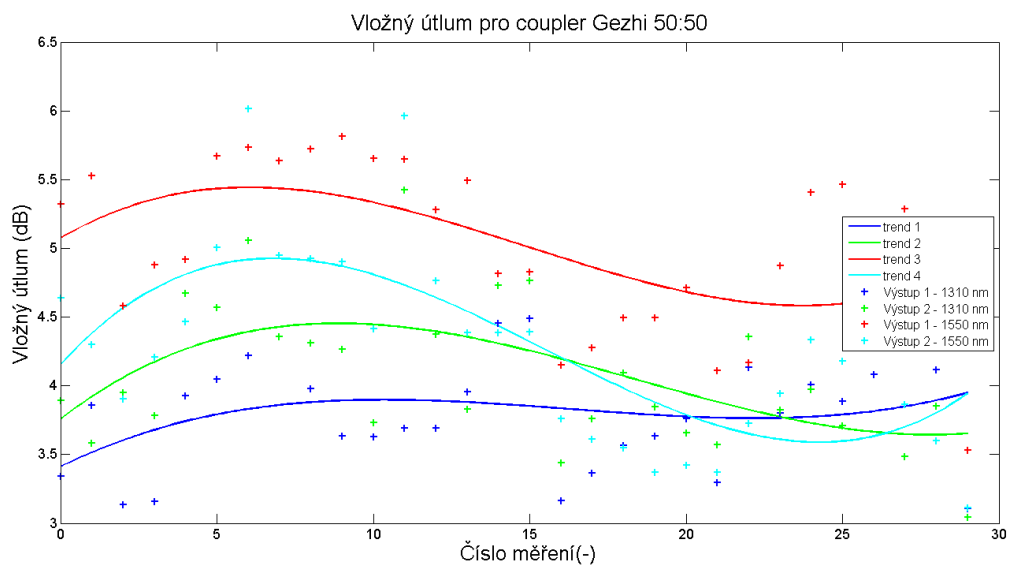
Tabulka 19: Měření 1: Směrnost Gezhi 1:99

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	75.78
1550nm	76.6

Tabulka 20: Měření 30: Směrnost Gezhi 1:99

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	77.95
1550nm	79.39

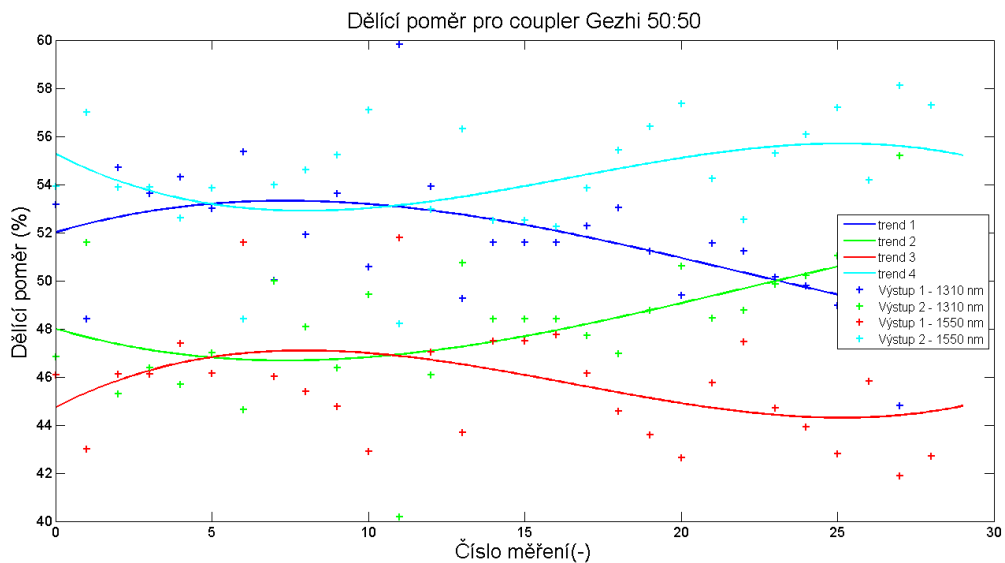
5.3 Gezhi 50:50



Obrázek 27: Vložený útlum: Gezhi 50:50

V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty vloženého útlumu při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu vyčteme, že hodnoty vloženého útlumu byly v průběhu měření velice proměnlivé. Nejprve docházelo k růstu hodnoty vloženého útlumu, po 7 týdnech měření nám trend značí následný pokles tohoto útlumu.

Měření 1		Měření 30	
Tabulka 21: Vložený útlum Gezhi 50:50		Tabulka 22: Vložený útlum Gezhi 50:50	
Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)	Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	3.34	Výstup 1, 1310nm	3.1
Výstup 1, 1550nm	5.32	Výstup 1, 1550nm	3.53
Výstup 2, 1310nm	3.89	Výstup 2, 1310nm	3.04
Výstup 2, 1550nm	4.64	Výstup 2, 1550nm	3.11



Obrázek 28: Dělicí poměr: Gezhi 50:50

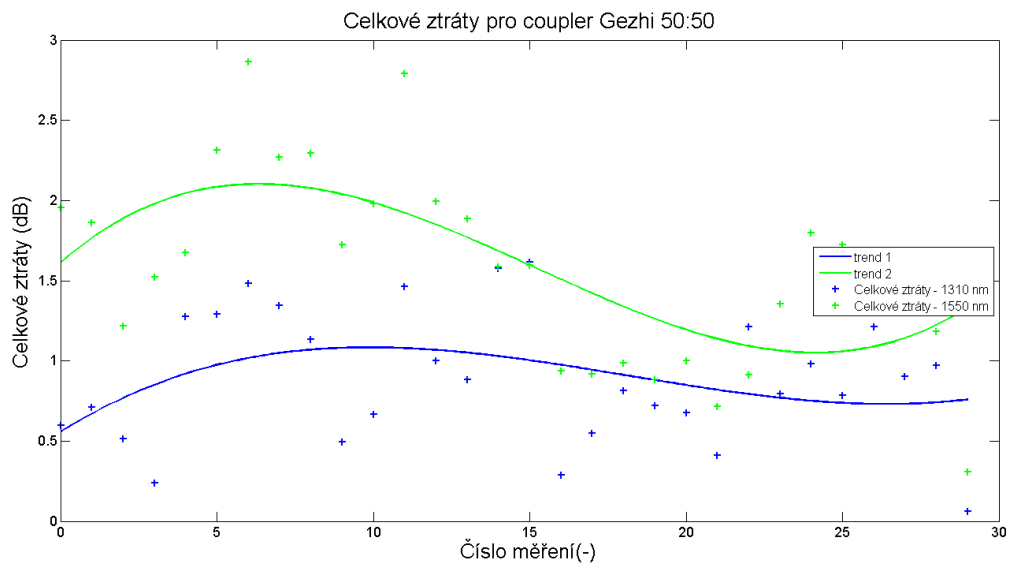
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty dělicího poměru při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu vyčteme, že trend dělicího poměru pro výstup č. 1, pro obě vlnové délky nejprve narůstal. Po 7 týdnech měření však došlo k poklesu hodnot dělicího poměru, který přetrval až do konce měření. Pro výstup č. 2 byl průběh opačný, nejprve došlo k poklesu hodnot dělicího poměru, který po dosažení 7 měření vystřídal nárůst. Postupný nárůst hodnot dělicího poměru přetrval až do konce měření.

Tabulka 23: Měření 1: Dělicí poměr Gezhi 50:50

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (%)
Výstup 1, 1310nm	53.15
Výstup 1, 1550nm	46.09
Výstup 2, 1310nm	46.85
Výstup 2, 1550nm	53.91

Tabulka 24: Měření 30: Dělicí poměr Gezhi 50:50

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	49.64
Výstup 1, 1550nm	47.59
Výstup 2, 1310nm	50.36
Výstup 2, 1550nm	52.41



Obrázek 29: Celkové ztráty: Gezhi 50:50

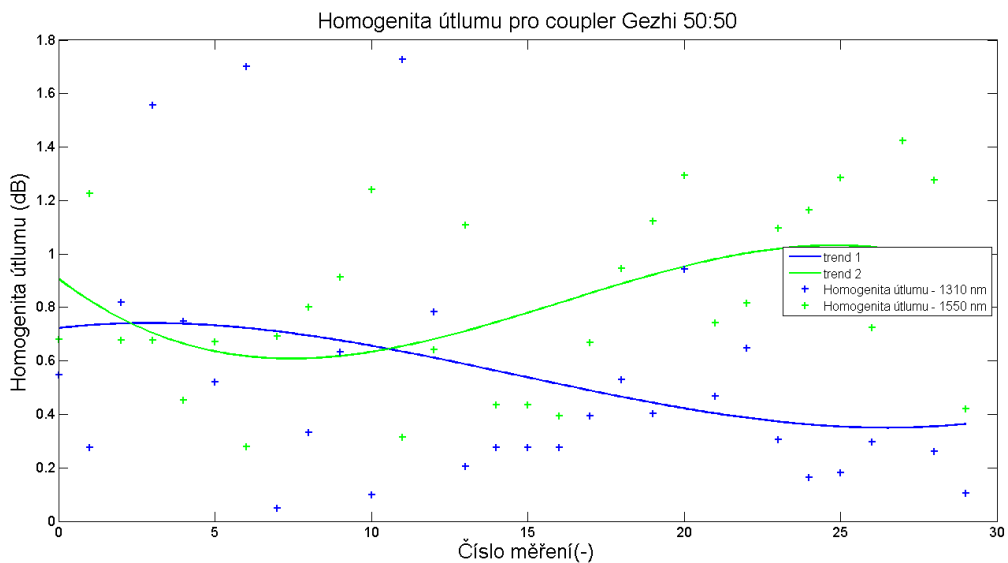
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty celkových ztrát při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu můžeme pozorovat, jak se měřené hodnoty v průběhu měření výrazně měnily. Díky aproximaci výsledků však můžeme v těchto skokových změnách naměřených hodnot pozorovat do 8 týdne měření růst. Dále se hodnota celkových ztrát pro vlnovou délku 1310 nm ustálila. Pro vlnovou délku 1550 nm jsem pozoroval postupný pokles hodnot.

Tabulka 25: Měření 1: Celkové ztráty Gezhi 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	0.6
1550nm	1.95

Tabulka 26: Měření 30: Celkové ztráty Gezhi 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	0.06
1550nm	0.31



Obrázek 30: Homogenita útlumu: Gezhi 50:50

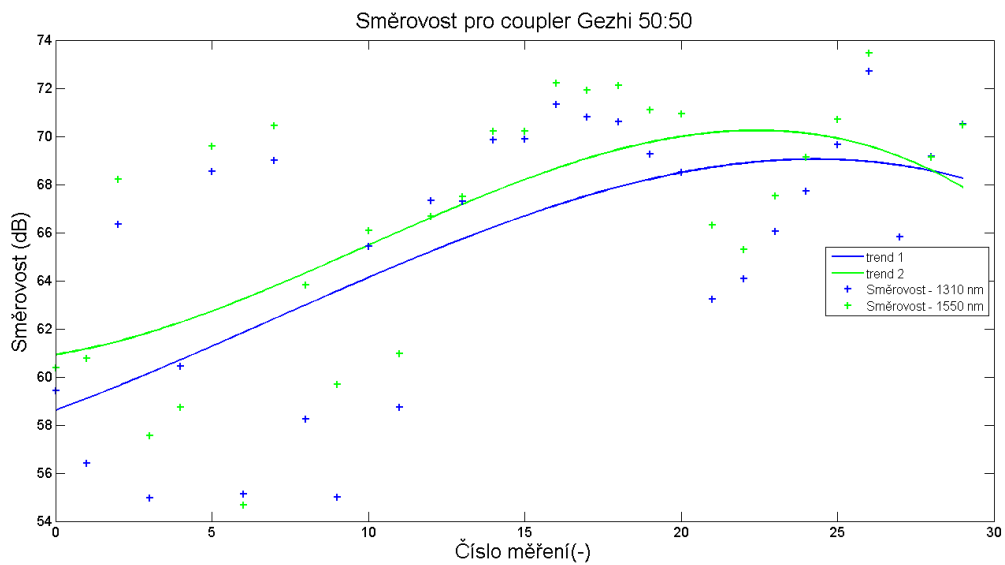
Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu pozorujeme skokové změny hodnot homogenity útlumu pro obě měřené vlnové délky. Díky aproximaci zaznamenaných hodnot je však patrné, že pro vlnovou délku 1310 nm došlo k poklesu zaznamenaných hodnot, který přetrval po celou dobu měření. Pro vlnovou délku 1550 nm pokles zaznamenaných hodnot probíhal do 6 týdne, poté se hodnota homogenity útlumu začala zvyšovat. Pro vlnovou délku 1310 nm byla průměrná hodnota homogenity útlumu 0,55 dB a pro vlnovou délku 1550 nm byla tato hodnota 0,82 dB.

Tabulka 27: Měření 1: Homogenita útlumu Gezhi 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	0.55
1550nm	0.68

Tabulka 28: Měření 30: Homogenita útlumu Gezhi 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	0.11
1550nm	0.42



Obrázek 31: Směrovost: Gezhi 50:50

Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu je patrný postupný růst hodnoty směrovosti pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. Z naměřených dat lze vyvodit, že tepelné namáhání pozitivně ovlivnilo optický coupler výrobce Gezhi s dělicím poměrem 50:50. U vlnové délky 1310 nm byla v posledním měření zaznamenána hodnota o 11,08 dB vyšší, než tomu bylo u prvního měření. Pro vlnovou délku 1550 nm byla poslední naměřená hodnota o 10,1 dB vyšší než u prvního měření.

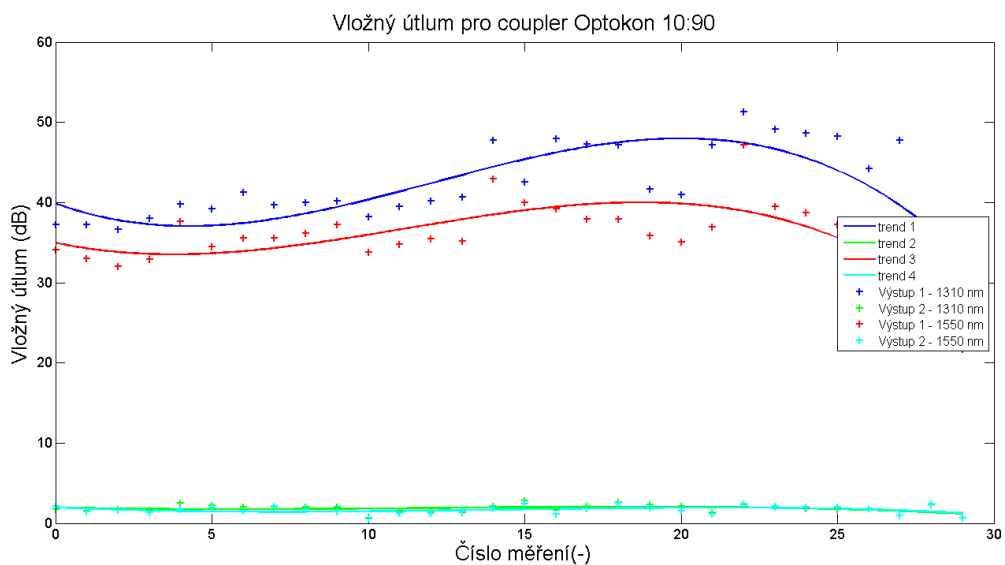
Tabulka 29: Měření 1: Směrovost Gezhi 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	59.43
1550nm	60.38

Tabulka 30: Měření 30: Směrovost Gezhi 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	70.51
1550nm	70.48

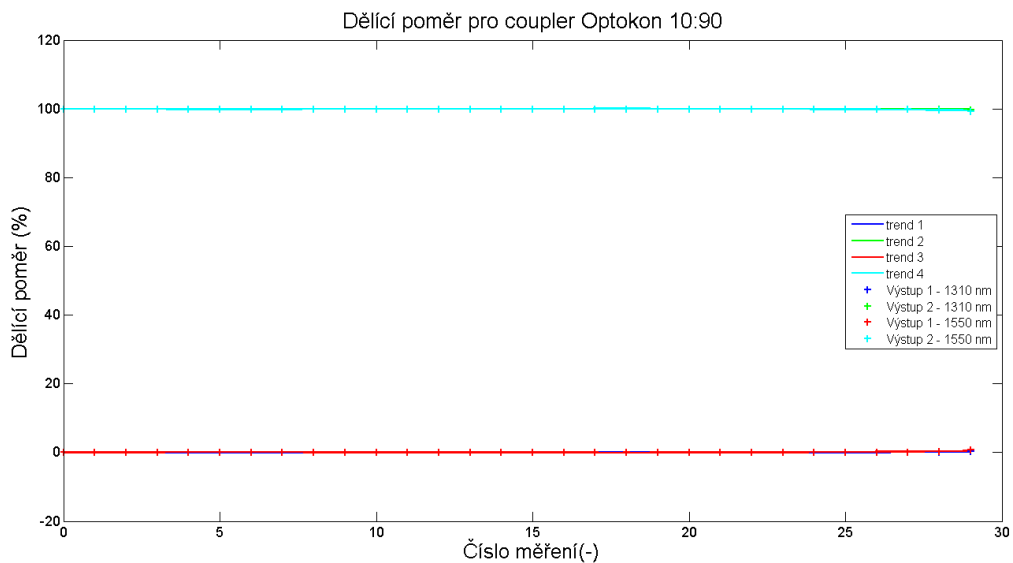
5.4 Optokon 10:90



Obrázek 32: Vložený útlum: Optokon 10:90

V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty vloženého útlumu při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu si všimneme, že hodnota vloženého útlumu pro výstup č. 1 pro obě vlnové délky postupně rostla. Hodnota vloženého útlumu se u výstupu č. 2 po dobu měření takřka neměnila.

Měření 1		Měření 30	
Tabulka 31: Vložený útlum Optokon 10:90		Tabulka 32: Vložený útlum Optokon 10:90	
Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)	Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	37.2	Výstup 1, 1310nm	25.4
Výstup 1, 1550nm	34.1	Výstup 1, 1550nm	21.74
Výstup 2, 1310nm	1.74	Výstup 2, 1310nm	0.59
Výstup 2, 1550nm	2.15	Výstup 2, 1550nm	0.68



Obrázek 33: Dělicí poměr: Optokon 10:90

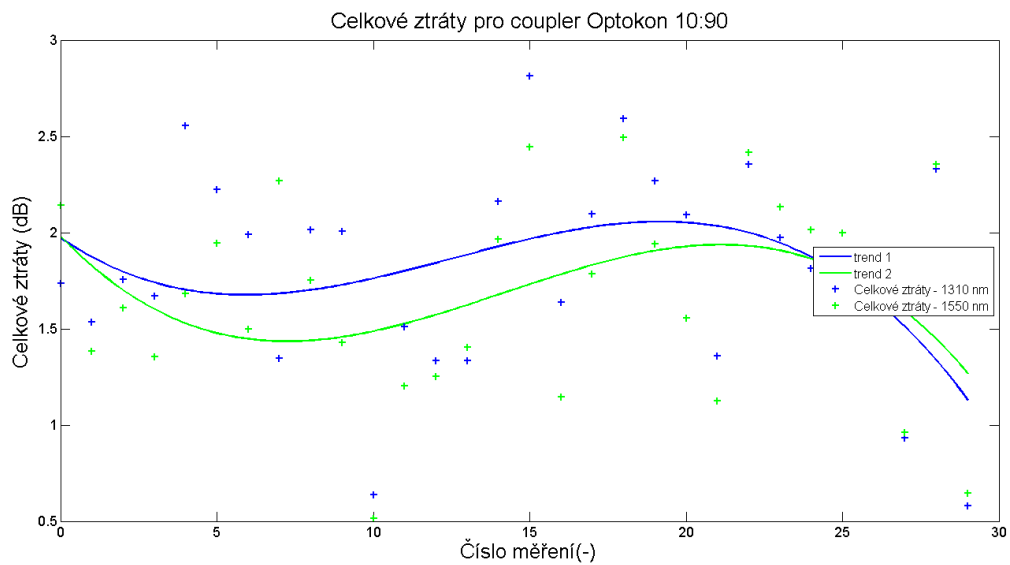
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty dělicího poměru při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu je patrné, že tepelné namáhání nezpůsobilo coupleru výrobce Optokon s dělicím poměrem 10:90 zásadní změny. Oproti prvnímu měření došlo ke zvýšení hodnot výstupu č. 1, které je patrné v tabulkách níže.

Tabulka 33: Měření 1: Dělicí poměr Optokon 10:90

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (%)
Výstup 1, 1310nm	0.03
Výstup 1, 1550nm	0.06
Výstup 2, 1310nm	99.97
Výstup 2, 1550nm	99.94

Tabulka 34: Měření 30: Dělicí poměr Optokon 10:90

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	0.33
Výstup 1, 1550nm	0.78
Výstup 2, 1310nm	99.67
Výstup 2, 1550nm	99.22



Obrázek 34: Celkové ztráty: Optokon 10:90

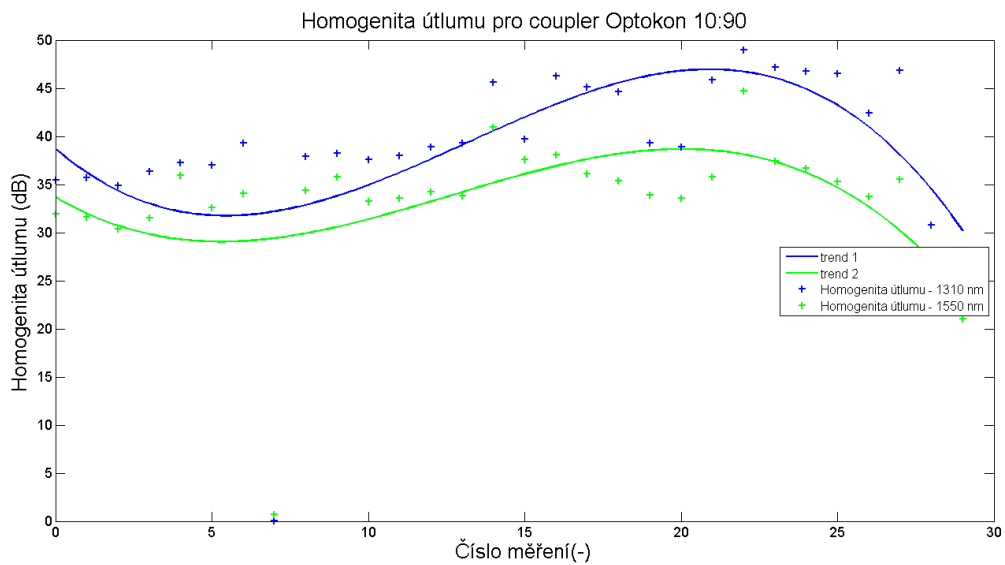
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty celkových ztrát při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu vyčteme, že celkové ztráty obou vlnových délek nejprve klesaly. Po 5 týdnech měření jsem začal pozorovat nárůst těchto hodnot. Po 24 týdnech byla zaznamenána sestupná tendence měřených hodnot. Tato sestupná tendence přetrvávala až do konce měření.

Tabulka 35: Měření 1: Celkové ztráty Optokon 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	1.74
1550nm	2.14

Tabulka 36: Měření 30: Celkové ztráty Optokon 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	0.58
1550nm	0.64



Obrázek 35: Homogenita útlumu: Optokon 10:90

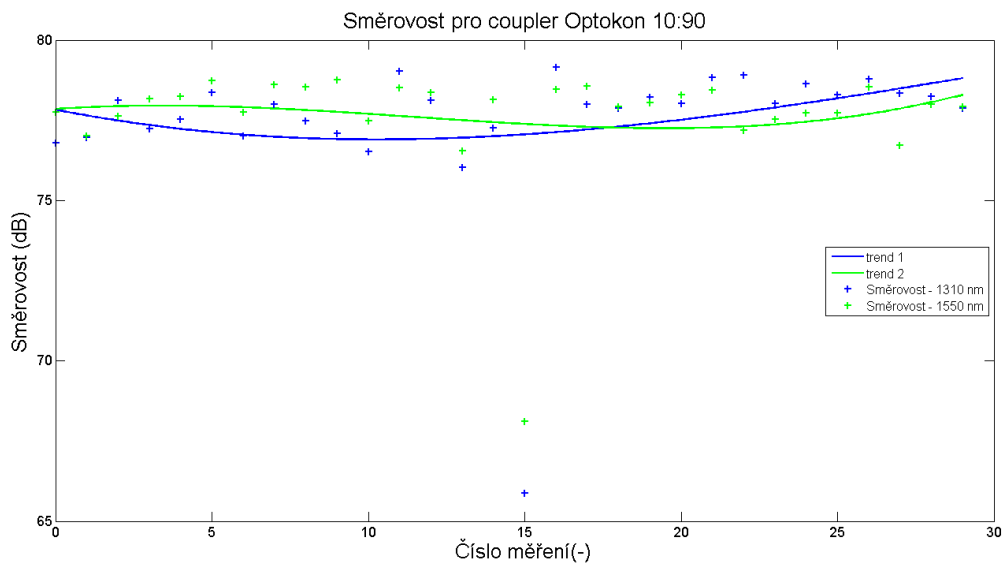
Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu pozorujeme růst hodnot homogenity útlumu. Po dosažení 23 týdnu měření však dochází k poklesu zaznamenaných hodnot. Průměrnou hodnotou pro vlnovou délku 1310 nm bylo 38,84 dB a pro vlnovou délku 1550 nm se průměrná hodnota pohybovala na 33,14 dB.

Tabulka 37: Měření 1: Homogenita útlumu Optokon 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	35.46
1550nm	31.95

Tabulka 38: Měření 30: Homogenita útlumu Optokon 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	24.81
1550nm	21.05



Obrázek 36: Směrovost: Optokon 10:90

Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu můžeme pozorovat, že se hodnoty směrovosti pozvolně v průběhu měření zvyšují. Při srovnání prvního a posledního měření, došlo u tohoto sledovaného parametru pro vlnovou délku 1310 nm ke zvýšení o 1,09 dB a pro vlnovou délku 1550 nm ke zvýšení o 0,18 dB. Pro obě vlnové délky byla směrovost na dostatečně vysoké úrovni.

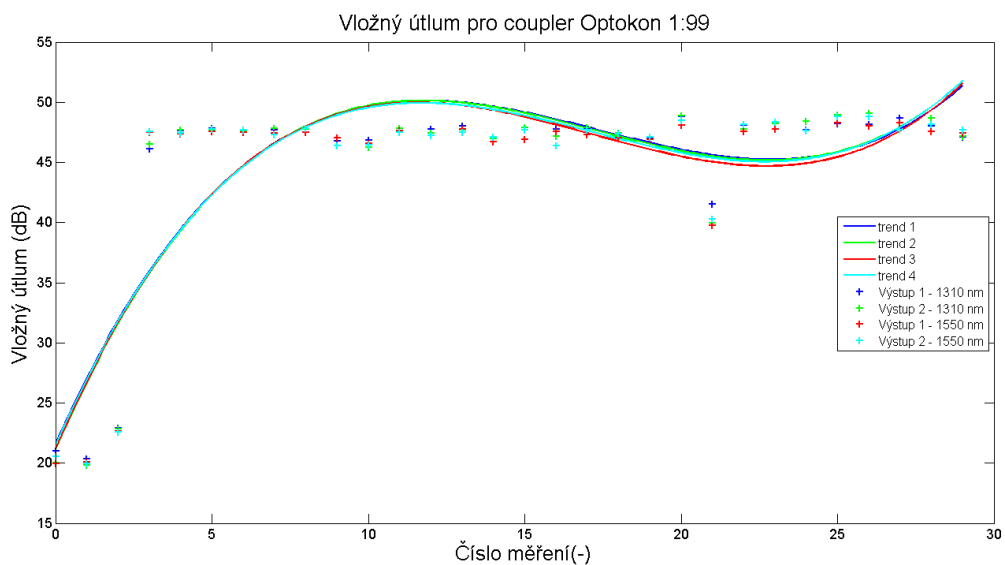
Tabulka 39: Měření 1: Směrovost Optokon 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	76.79
1550nm	77.74

Tabulka 40: Měření 30: Směrovost Optokon 10:90

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	77.88
1550nm	77.92

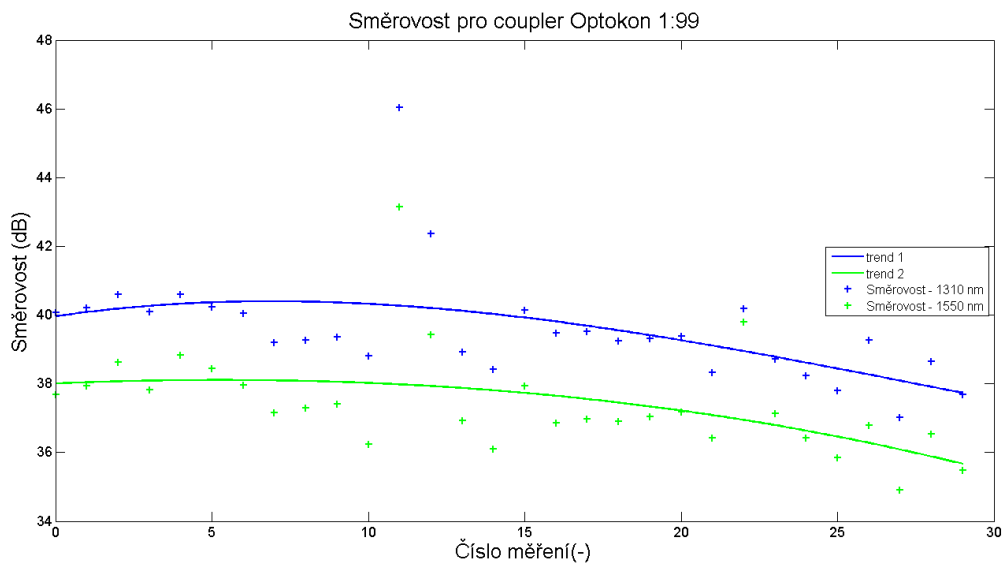
5.5 Optokon 1:99



Obrázek 37: Vložený útlum: Optokon 1:99

V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty vloženého útlumu při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Coupler od společnosti Optokon s dělicím poměrem 1:99 byl nejspíše již při prvním měření poškozen. Toto poškození po 3 týdnech tepelného namáhání způsobilo neměřitelnost coupleru. Hodnoty výkonu, které se během pokračujícího měření vyskytovali byli velice nízké. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl ve své bakalářské práci nepopisovat veškeré grafy tohoto coupleru. Další popsání graf tak bude směrovost.

Měření 1		Měření 30	
Tabulka 41: Vložený útlum Optokon 1:99		Tabulka 42: Vložený útlum Optokon 1:99	
Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)	Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	20.99	Výstup 1, 1310nm	47.07
Výstup 1, 1550nm	19.97	Výstup 1, 1550nm	47.43
Výstup 2, 1310nm	19.99	Výstup 2, 1310nm	47.14
Výstup 2, 1550nm	20.51	Výstup 2, 1550nm	47.69



Obrázek 38: Směrnost: Optokon 1:99

Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu je patrné, že se hodnota směrovosti během měření postupně snižuje. V případě směrovosti se jednalo o jediný parametr, u kterého jsem na měřicím přístroji nezaznamenával hodnoty šumu. Na začátku měření byla zaznamenána hodnota směrovosti pro vlnovou délku 1310 nm na 40.06 dB. Hodnota, o kterou se směrovost pro tuto vlnovou délku snížila za dobu měření činí 2,38 dB. Pro vlnovou délku 1550 nm jsme při prvním měření zaznamenali hodnotu směrovosti 37.67 dB. Celkový pokles pro tuto vlnovou délku činil 2,19 dB. Je patrné, že hodnota přeslechu je u tohoto coupleru nízká a coupler již tak není pro běžné použití vhodný.

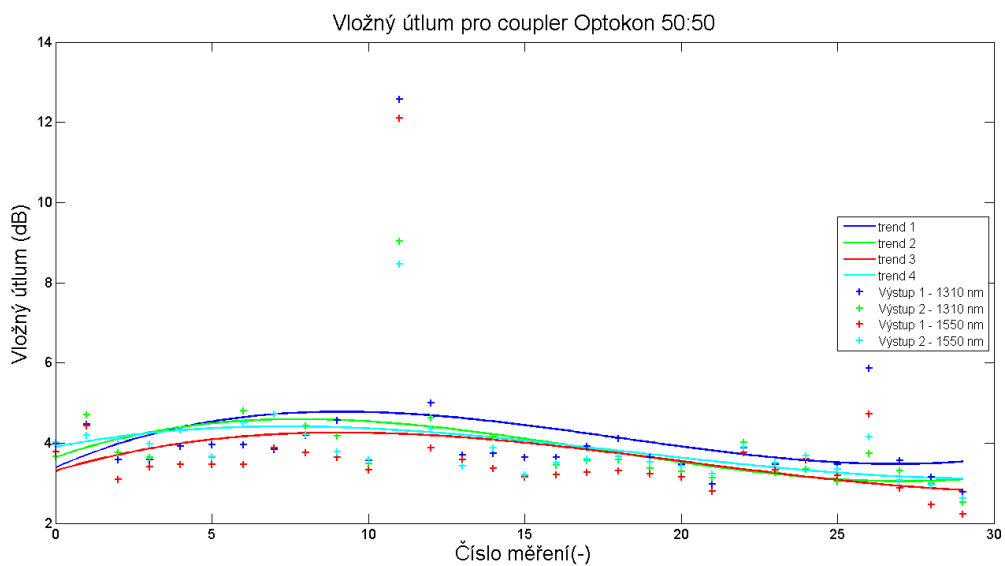
Tabulka 43: Měření 1: Směrnost Optokon 1:99

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	40.06
1550nm	37.67

Tabulka 44: Měření 30: Směrnost Optokon 1:99

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	37.68
1550nm	35.48

5.6 Optokon 50:50



Obrázek 39: Vložený útlum: Optokon 50:50

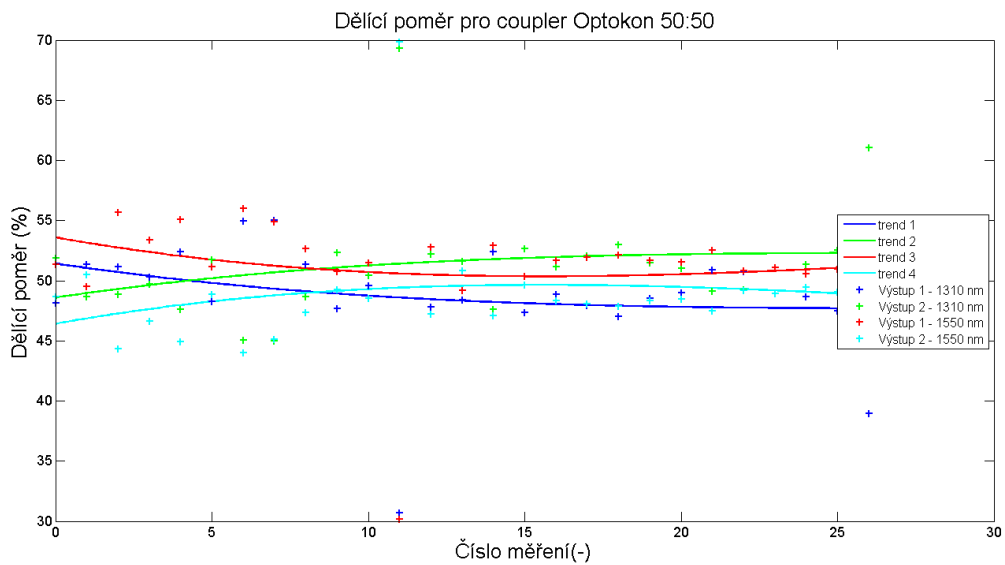
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty vloženého útlumu při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu je patrné, že vložený útlum z počátku narůstá, však po 12 týdnu měření začíná postupně klesat.

Tabulka 45: Měření 1: Vložený útlum Optokon 50:50

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	20.99
Výstup 1, 1550nm	19.97
Výstup 2, 1310nm	19.99
Výstup 2, 1550nm	20.51

Tabulka 46: Měření 30: Vložený útlum Optokon 50:50

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	47.07
Výstup 1, 1550nm	47.43
Výstup 2, 1310nm	47.14
Výstup 2, 1550nm	47.69



Obrázek 40: Dělicí poměr: Optokon 50:50

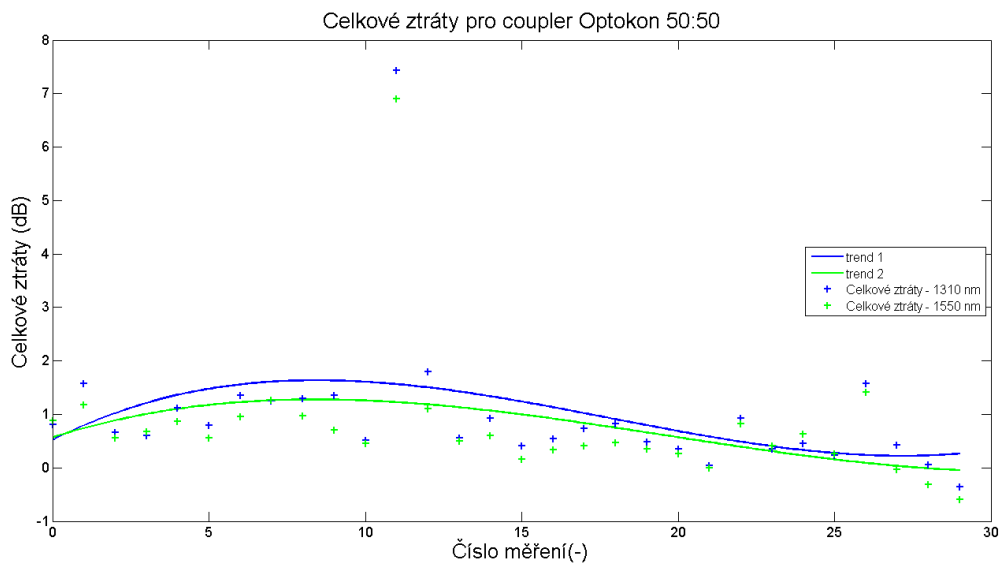
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty dělicího poměru při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu vyčteme, že se dělicí poměr pro výstupy č. 1 nejprve snižoval. Po 5 měření v došlo k ustálení hodnoty dělicího poměru. U výstupu č. 2 byl průběh opačný, nejprve došlo k růstu hodnot a následně po 6 měření k ustálení dělicího poměru.

Tabulka 47: Měření 1: Dělicí poměr Optokon 50:50

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (%)
Výstup 1, 1310nm	48.12
Výstup 1, 1550nm	51.36
Výstup 2, 1310nm	51.87
Výstup 2, 1550nm	48.63

Tabulka 48: Měření 30: Dělicí poměr Optokon 50:50

Výstup + Vlnová délka	Hodnota (dB)
Výstup 1, 1310nm	48.53
Výstup 1, 1550nm	52.21
Výstup 2, 1310nm	51.47
Výstup 2, 1550nm	47.78



Obrázek 41: Celkové ztráty: Optokon 50:50

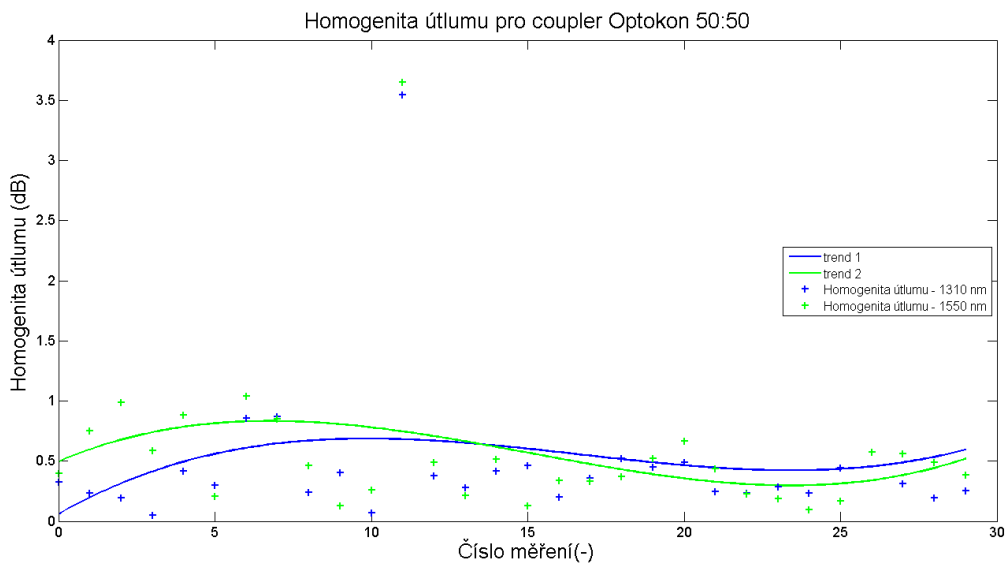
V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty celkových ztrát při prvním měření. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu pozorujeme rostoucí tendence celkových ztrát obou vlnových délek. Po 7 týdnu měření však začala hodnota celkových ztrát klesat. Klesající tendence přetrvala až do konce měření.

Tabulka 49: Měření 1: Celkové ztráty Optokon 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	0.81
1550nm	0.88

Tabulka 50: Měření 30: Celkové ztráty Optokon 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	0
1550nm	0



Obrázek 42: Homogenita útlumu: Optokon 50:50

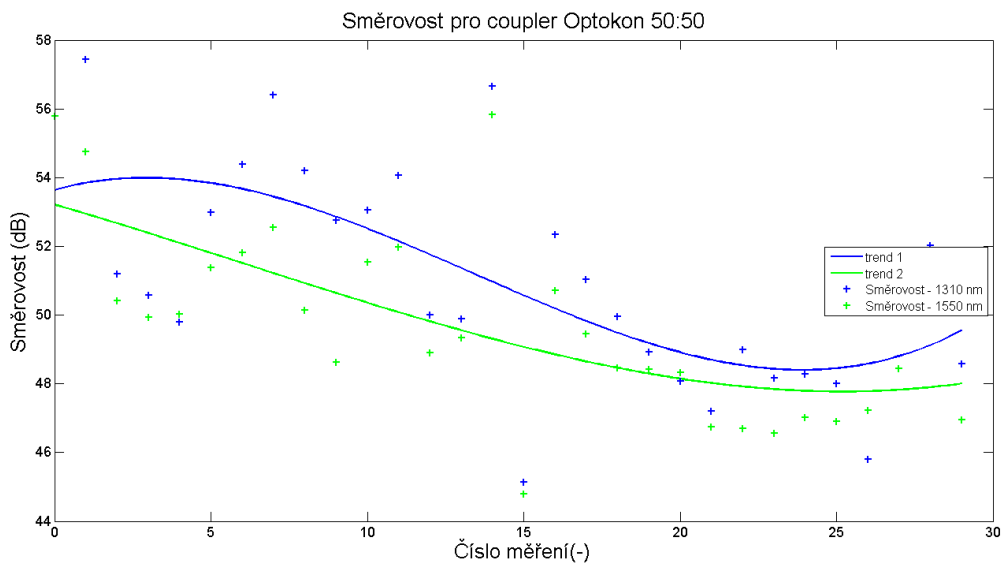
Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. V grafu pozorujeme, že do 8 týdne měření bylo zaznamenáno postupné zvyšování hodnot. Po zbytek měření byla dále zaznamenána sestupná tendence zaznamenaných hodnot. Průměrná hodnota pro vlnovou délku 1310 nm činila 0,51 dB a pro vlnovou délku 1550 nm činila 0,56 dB.

Tabulka 51: Měření 1: Homogenita útlumu Optokon 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	35.46
1550nm	31.95

Tabulka 52: Měření 30: Homogenita útlumu Optokon 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	24.81
1550nm	21.05



Obrázek 43: Směrovost: Optokon 50:50

Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v tabulce níže. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty posledního prováděného měření. Z grafu je patrné, že se hodnota směrovost během měření postupně snižuje. Tato sestupná tendence přetrvala po celou dobu měření. Po 19 týdnech měření se hodnota směrovosti dostala pod hodnotu 50 dB. Tento pokles lze přisuzovat prováděnému tepelnému namáhání tohoto optického coupleru.

Tabulka 53: Měření 1: Směrovost Optokon 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	55,79
1550nm	55,78

Tabulka 54: Měření 30: Směrovost Optokon 50:50

Vlnová délka	Hodnota (dB)
1310nm	48,58
1550nm	46,95

6 Závěr a vyhodnocení

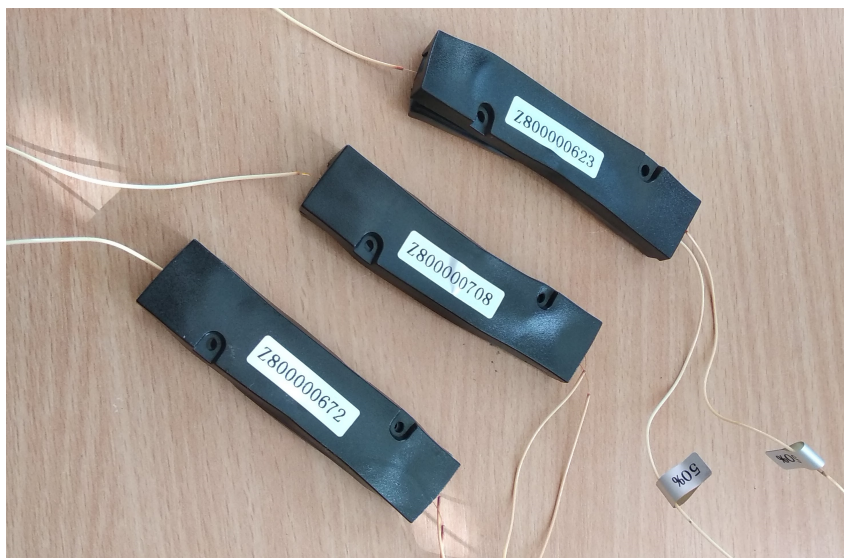
Cílem této bakalářské práce bylo zjistit vliv tepelného namáhání na vybrané parametry optických couplerů. Těmito parametry byly vloženy útlum, dělicí poměr, celkové ztráty, homogenita útlumu a směrovost.

Tato bakalářské práce se členila na jednotlivé části. Každá z těchto částí byla vypracována v samostatné kapitole.

Celkové vyhodnocení naměřených dat provedu pro každého výrobce odděleně. Pro tento postup vyhodnocení jsem se rozhodl z důvodu, že každý z těchto dvou výrobců dodává couplery v jiném pouzdře.

6.1 Gezhi

Couplery výrobce Gezhi byly zhotoveny v plastovém pouzdře, které se následkem tepelného namáhání deformovalo. Nelze vyloučit, že tato deformace pouzder neměla dopad na naměřené hodnoty optických couplerů tohoto výrobce. Z tohoto důvodu bych nedoporučoval užití těchto couplerů v prostředí, kde hrozí možnost vystavení působení zvýšené teploty na couplery samotné. Na obrázku č. 45 je vyfocena úroveň této deformace.



Obrázek 44: Gezhi - úroveň deformace couplerů

- Vložený útlum

Z grafů je patrné, že tepelné namáhání nejvíce ovlivnilo vložený útlum pro vlnovou délku 1550 nm. Zde došlo ke snížení měřených hodnot vloženého útlumu průměrně o 2,85 dB. K největšímu snížení došlo u coupleru 10:90, v průměru o 5,76 dB. Nižší pokles byl pak zaznamenán u vlnové délky 1310 nm. Zde bylo průměrné snížení hodnot vloženého útlumu 0,92 dB, přičemž opět největšího snížení dosáhl coupler 10:90 a to s průměrnou hodnotou 1,89 dB.

- Dělící poměr

Pro couplery různých dělících poměrů nedošlo v průběhu měření k zásadním změnám. Výraznější změny pak pozorujeme u coupleru 50:50. U výstup č. 1 se během prvních 6 týdnů měření zvyšuje hodnota dělícího poměru, však posléze dochází k jeho snižování. Tento fakt byl pozorován pro obě vlnové délky. V případě výstupu č. 2 byl pozorován opačný trend. Je možné, že na základě zdeformování tohoto coupleru tepelným namáháním, došlo k ovlivnění parametru dělícího poměru.

- Celkové ztráty

Na základě vyhodnocení naměřených dat, lze usuzovat, že tepelné namáhání mělo pozitivní vliv na hodnoty celkových ztrát. V průběhu měření došlo ke zlepšení hodnot tohoto parametru.

- Homogenita útlumu

U tohoto parametru bylo zaznamenán výskyt zhoršených hodnot. Největšího zhoršení bylo zaznamenáno pro vlnovou délku 1550 nm. Zde došlo k nejpozorovatelnějším změnám, při kterých došlo ke zhoršení hodnot tohoto parametru. Pro vlnovou délku bylo pozorováno mírné zlepšení hodnot homogenity útlumu. Jen u coupleru 1:99 jsem pozoroval zlepšení parametru pro obě vlnové délky.

- Směrovost

Směrovost všech měřených couplerů výrobce Gezhi zaznamenala po čas měření rostoucí hodnoty. Z toho lze usuzovat že tepelné namáhání způsobilo zlepšení hodnot směrovosti.

6.2 Optokon

Couplery výrobce Optokon byly zhotoveny v plechovém pouzdře. Vlákna těchto couplerů byla opatřena větší chránou, než jak tomu bylo u výrobce Gezhi. Na obrázku č. 46 je patrné, jaký byl vliv tepelného namáhání na stav couplerů tohoto výrobce.



Obrázek 45: Optokon - úroveň deformace couplerů

- Vložený útlum

U coupleru 10:90 došlo k nejvýraznějším změnám u výstupu č. 1. Zde pozorujeme postupný růst vloženého útlumu. Tento růst přisuzuji právě tepelnému namáhání. Z naměřených dat jsem pozoroval, že se výstup č. 2 v zásadě neměnil.

U coupleru 50:50 došlo pro všechny měřené vlnové délky a výstupy k podobnému průběhu. V prvním 5 týdnech docházelo vlivem tepelného namáhání k postupnému růstu vloženého útlumu. Ten však po překlenutí 6 týdne měření začal klesat. Klesající tendence přetrvávala až do konce měření

- Dělicí poměr

Obdobně jak tomu bylo u couplerů výrobce Gezhi, ani zde nedošlo k zásadním změnám pro coupler rozdílného dělicího poměru. Výraznějších změn bylo zpozorováno u coupleru 50:50, kdy došlo k pozvolnému poklesu zaznamenaných hodnot pro obě vlnové délky výstupu č. 1. Na rozdíl od coupleru 50:50 výrobce Gezhi, zde můžeme pozorovat od 15 týdne měření ustálení zaznamávaných hodnot. Proto usuzuji, že v tomto případě tepelné namáhání pozitivně ovlivnilo dělicí poměr tohoto coupleru.

- Celkové ztráty

Stejně jako u výrobce Gezhi, i zde lze pozorovat zlepšení hodnot celkových ztrát po tepelném namáhání.

- Homogenita útlumu

U tohoto parametru jsem v počátku měření coupleru 10:90 zaznamenal zvyšování hodnoty homogenity útlumu. Však v posledních 2 týdnech měření došlo k prudkému poklesu. Pro coupler 50:50 bylo také pozorováno snížení homogenity útlumu, však ne tak výrazně. Na základě tohoto předpokládám, že tepelné namáhání pozitivně ovlivnilo homogenitu útlumu zatěžovaných couplerů.

- Směrovost

U optického coupleru 10:90 jsem pozoroval po celou dobu měření nepatrné zvyšování hodnot směrovosti. Při měření coupleru 1:99 jsem pozoroval postupný pokles hodnot směrovosti, přičemž již první měření vykazovalo hodnoty pod hranicí 50 dB. Pro optický coupler 50:50 jsem po dobu měření pozoroval postupné snižování hodnot směrovosti. Po 19 týdnech tepelného namáhání klesla hodnota směrovosti pod hranici 50 dB.

Odkazy

- [1] KARTALOPOULOS, Stamatios V. Introduction to DWDM technology: data in a rainbow. Bellingham, Wash.: SPIE Optical Engineering Press, c2000, xxii, 252 p. ISBN 0780353994.
- [2] DERICKSON, Dennis. Fiber optic test and measurement. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, c1998, xx, 642 p. ISBN 0135343305.
- [3] DUTTA K., Achyut a Masahiko FUJIWARA. WDM technologies: passive optical components. Amsterdam: Academic Press, c2003, xix, 513 s. ISBN 0122252624.
- [4] 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.
- [5] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody - část 1. Základní principy. Světlo. 2005, vol. 01, p. ISSN: 1212-0812
- [6] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje - světelné diody. Světlo. 2009, vol. 05, p. 68 - 71 ISSN: 1212-0812
- [7] BEDNÁREK, Lukáš a kol. The ageing process of optical couplers by gamma irradiation. Proceedings of SPIE - The international Society for Optical Engineering. 2015, vol. 9586, p. 1-10. ISBN: 978-1-62841-752-4
- [8] Šiška, Petr a kol. Optické komunikace a optoelektronika - OPTICE [online]. Copyright © [cit. 21.03.2018]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/images/optice/predmety/OPTE/skripta>
- [9] PERECAR, Frantisek, a kol. The influence of temperature loading on the optical fiber passive components. In: Fiber Optic Sensors and Applications XIV. International Society for Optics and Photonics, 2017. p. 1020812.
- [10] PERECAR, Frantisek, a kol. The behavior of the geometrical parameters of optical beam of optical passive components under the long time thermal load. In: Photonics, Devices, and Systems VII. International Society for Optics and Photonics, 2017. p. 106030S.
- [11] BEDNAREK, Lukas, a kol. Influence of load by high power on the optical coupler. In: 20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics. International Society for Optics and Photonics, 2016. p. 1014218.
- [12] BEDNAREK, Lukas, a kol. The influence of thermal aging on the optical coupler. In: Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications X. International Society for Optics and Photonics, 2016. p. 99580X.

- [13] BEDNAREK, Lukas, a kol. The aging process of optical couplers by gamma irradiation. In: Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications IX. International Society for Optics and Photonics, 2015. p. 958613.
- [14] PAPES, Martin, a kol. Measurement of attenuation changes of PON elements with temperature. In: 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics. International Society for Optics and Photonics, 2012. p. 86971R.
- [15] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. Optické přístupové sítě a přípojky FTTx. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05463-5

A Naměřené hodnoty

Obsah této přílohy je na přiloženém CD - soubory excel s naměřenými hodnotami