

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Daniel Prokop



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# ROZBOR A KONSTRUKCE OPTICKÉHO LADITELNÉHO VLÁKNOVÉHO ÚTLUMOVÉHO ČLÁNKU PRO TELEKOMUNIKAČNÍ APLIKACE

ANALYSIS AND CONSTRUCTION OF AN OPTICAL FIBRE TUNABLE ATTENUATOR FOR  
TELECOMMUNICATION APPLICATIONS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Daniel Prokop**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. František Urban**

**BRNO 2018**





# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Daniel Prokop

**ID:** 138486

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### **Rozbor a konstrukce optického laditelného vláknového útlumového článku pro telekomunikační aplikace**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je rozbor jednotlivých konstrukcí optických vláknových laditelných útlumových článků, jejich porovnání a výběr vhodného řešení pro telekomunikační aplikace. Výstupem práce bude návrh a konstrukce samostatného modulu s ovládacími prvky pro řízení útlumu optického signálu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Brno: M. Filka, 2009. ISBN 978-80-867-5-14-1.

[2] DONATI, Silvano. Photodetectors: devices, circuits, and applications. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, c2000. ISBN 0-13-020337-8.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. František Urban

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá možnostmi konstrukce modulu pro řízení útlumu optického signálu. V rámci řešení je rozebrána problematika přenosu paprsku optickým vláknem a jevů působících na paprsek. V práci jsou charakterizovány varianty útlumových článků a na základě poznatků navrženo řešení modulu pro řízení útlumu optického signálu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

MEMS, útlumový článek, VOA, útlum, disperze

## **ABSTRACT**

This paper deals with the possibilities of designing the module for control of the attenuation of the optical signal. The paper describes basics of fiber optic transmission and beam effects. Variants of attenuation cells are characterized in this paper and based on the findings a solution of the module for control of the attenuation of the optical signal is proposed.

## **KEYWORDS**

MEMS, attenuator, VOA, attenuation, dispersion

PROKOP, Daniel. *Rozbor a konstrukce optického laditelného vláknového útlumového článku pro telekomunikační aplikace*. Brno, Rok, 93 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. František Urban

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Rozbor a konstrukce optického laditelného vláknového útlumového článku pro telekomunikační aplikace“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Františku Urbanovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)



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

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# OBSAH

Úvod	13
<b>1 Teoretická část práce</b>	<b>14</b>
1.1 Optické vlákno jako přenosové médium	14
1.2 Struktura a druhy optických vláken	16
1.2.1 Single Mode vlákna	17
1.2.2 Multi-Mode vlákna	18
1.3 Útlum optických vláken	20
1.3.1 Ztráty absorpcí	20
1.3.2 Ztráty rozptylem	21
1.3.3 Ztráty vyzařováním	21
1.3.4 Ztráty při navazování paprsku mezi vlákny	22
1.4 Telekomunikační pásmo	26
1.5 Disperze v optických vláknech	27
1.5.1 Fázová rychlost šíření	27
1.5.2 Skupinová (grupová) rychlost šíření	27
1.5.3 Vidová disperze	28
1.5.4 Chromatická disperze	28
1.5.5 Polarizační vidová disperze	29
1.6 Metody měření útlumu	30
1.6.1 Metoda dvou délek	30
1.6.2 Metoda vložného útlumu	31
1.6.3 Metoda zpětného rozptylu	31
1.7 Zdroje optického záření	32
1.7.1 LED zdroje	32
1.7.2 LASEROvé zdroje	32
1.8 Fotodetektory	34
1.8.1 Fotodioda PIN	34
1.8.2 Lavinová fotodioda APD	35
1.9 Optický útlumový článek	36
1.9.1 Fixní	36
1.9.2 Variabilní	38
<b>2 Měření spektrálních vlastností</b>	
<b>variabilních optických útlumových článků</b>	<b>42</b>
2.1 Spektrum testovacího zdroje optického signálu	43
2.2 Měření spektrální závislosti fixních útlumových článků	44

2.3	Měření spektrální závislosti laditelného útlumového článku OZ Optics	45
2.4	Měření spektrální závislosti laditelného útlumového článku MEMS . . .	47
<b>3</b>	<b>Návrh modulu</b>	<b>49</b>
3.1	Vyhodnocení měření a definice požadavků . . . . .	49
3.2	Výběr součástek . . . . .	51
3.2.1	TAP diody . . . . .	51
3.2.2	A/D převodník - MCP3903 . . . . .	51
3.2.3	D/A převodník - MAX5217 . . . . .	52
3.2.4	Mikroprocesor ATSAM3X8E . . . . .	52
3.2.5	Vstupně/výstupní rozhraní . . . . .	53
3.3	Návrh digitální části obvodu . . . . .	54
3.3.1	D/A převodník . . . . .	54
3.3.2	A/D převodník . . . . .	54
3.3.3	Display a tlačítka . . . . .	54
3.4	Návrh analogové části obvodu . . . . .	56
3.4.1	Řízení útlumového článku MEMS . . . . .	56
3.4.2	Zesilovač fotodiody . . . . .	57
3.5	Deska plošných spojů (DPS) . . . . .	59
3.6	Program mikrokontroléru . . . . .	60
3.7	Popis zhotoveného zařízení . . . . .	62
3.7.1	Pouzdro . . . . .	62
3.7.2	Parametry a funkce zařízení . . . . .	63
3.8	Kalkulace ceny . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>66</b>
	<b>Literatura</b>	<b>68</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>70</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>71</b>
<b>A</b>	<b>Přílohy</b>	<b>72</b>
A.1	Spektrum zdroje optického signálu pro vlnové délky 1250 - 1400 nm .	72
A.2	Spektrum zdroje optického signálu pro vlnové délky 1518 - 1575 nm .	73
A.3	Spektrální závislost pevných útlumových článků pro vlnové délky 1250 - 1400 nm . . . . .	74
A.4	Spektrální závislost pevných útlumových článků pro vlnové délky 1518 - 1575 nm . . . . .	75

A.5	Spektrální závislost útlumového článku OZ Optics pro vlnové délky 1250 - 1400 nm . . . . .	76
A.6	Spektrální závislost útlumového článku OZ Optics pro vlnové délky 1518 - 1575 nm . . . . .	77
A.7	Spektrální závislost útlumového článku MEMS pro vlnové délky 1250 - 1400 nm . . . . .	78
A.8	Spektrální závislost útlumového článku MEMS pro vlnové délky 1518 - 1575 nm . . . . .	79
A.9	Katalogový list MEMS VOA 1550 nm . . . . .	80
A.10	Katalogový list SLED DL-CS3184A . . . . .	81
A.11	Katalogový list HY-ASE-C-G-13-M-FA . . . . .	83
A.12	Schéma zapojení . . . . .	84
A.13	Deska plošných spojů . . . . .	93



# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Grafické znázornění struktury optického vlákna a šíření paprsku vláknem . . . . .	15
1.2	Řez optickým vláknem [1-jádro (core), 2-plášť (cladding), 3-ochrana (rating), 4-volitelný obal proti mechanickým vlivům] . . . . .	16
1.3	Typy vláken - řezy [7] . . . . .	17
1.4	Průběh indexu lomu a řez single mode vláknem . . . . .	17
1.5	Šíření vidu v single mode vlákně . . . . .	18
1.6	Průběh indexu lomu a řezy step indexovým (vlevo) a gradientním (vpravo) vícevidovým vláknem . . . . .	18
1.7	Šíření vidů ve vícevidovém vlákně se skokovou změnou indexu lomu . . . . .	19
1.8	Šíření vidů v gradientním vícevidovém vlákně . . . . .	19
1.9	Útlumová charakteristika optického vlákna [2] . . . . .	20
1.10	Vliv Polarizační vidová disperze - Polarization Mode Dispersion (PMD) na signál ve vlákně [7] . . . . .	29
1.11	Měření útlumu metodou dvou délek . . . . .	30
1.12	Srovnání spektrální charakteristiky LED (vlevo) s Laserovými zdroji Fabry-Perot Laserová dioda (FP) (uprostřed) a Laserová dioda s distribuovanou zpětnou vazbou - Distributed FeedBack (DFB) (vpravo) . . . . .	33
1.13	Vnitřní struktura PIN diody s čelním dopadem záření [9] . . . . .	34
1.14	Vnitřní struktura APD diody s čelním dopadem záření [9] . . . . .	35
1.15	Útlumový článek in-line (vlevo) a konektorový typ (vpravo) . . . . .	36
1.16	Princip Absorpčního útlumového článku [11] . . . . .	37
1.17	Princip Reflektivního útlumového článku [11] . . . . .	37
1.18	Princip útlumového článku Gap-Loss [11] . . . . .	38
1.19	Laditelný útlumový článek založený na principu Gap-Loss[11] . . . . .	38
1.20	Kazeta pro zafixování konkrétní hodnoty útlumu ohybem [12] . . . . .	39
1.21	Princip funkce variabilního útlumového článku s ND filtrem . . . . .	39
1.22	Princip funkce variabilního útlumového článku se clonou . . . . .	40
1.23	Detail MOEMS struktury optického akčního členu VOA [14] . . . . .	40
1.24	Princip funkce variabilního útlumového článku MEMS . . . . .	41
1.25	Detail struktury MEMS jednoosého zrcadla [11] . . . . .	41
2.1	Měřicí pracoviště . . . . .	43
2.2	Zapojení měřících přístrojů . . . . .	43
2.3	Fixní atenuátor LC/APC o útlumu 1 dB . . . . .	44
2.4	Zapojení měřících přístrojů . . . . .	44
2.5	Digital Variable Attenuator od firmy OZ Optics . . . . .	45
2.6	Zapojení měřících přístrojů . . . . .	45

2.7	Laditelný útlumový člunek MEMS . . . . .	47
2.8	Zapojení měřících přístrojů . . . . .	47
3.1	Blokové schéma modulu útlumového člunku . . . . .	50
3.2	Zjednodušené schéma zapojení řízení útlumového člunku . . . . .	56
3.3	Útlum MEMS člunku v závislosti na nastavení D/A převodníku . . . . .	57
3.4	Zjednodušené schéma zapojení zesilovače fotodiody . . . . .	57
3.5	Osazená deska plošných spojů . . . . .	59
3.6	3D model modulu připevněného na vývojovou desku Arduino DUE . . . . .	59
3.7	Vývojový diagram programu mikrokontroléru . . . . .	60
3.8	Vývojový diagram obsluhy přerušení . . . . .	61
3.9	Čelní strana zařízení s displayem a ovládacími prvky . . . . .	62
3.10	Horní strana zařízení s optickým konektorem LC/APC . . . . .	62
3.11	Display přístroje v režimu SET . . . . .	63
3.12	Display přístroje v režimu LOCK . . . . .	64

# SEZNAM TABULEK

1.1	Pásma vlnových délek používaná k telekomunikačním účelům . . . . .	26
1.2	Materiály PIN fotodiod . . . . .	35
3.1	Hlavní parametry TAP diody Go!Foton . . . . .	51
3.2	Hlavní parametry převodníku MCP3903 . . . . .	52
3.3	Hlavní parametry převodníku MAX5217 . . . . .	52
3.4	Hlavní parametry vývojové platformy Arduino Due . . . . .	53
3.5	Hlavní parametry sestrojeného zařízení . . . . .	64
3.6	. . . . .	65

# ÚVOD A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tato práce se zabývá možnostmi konstrukce modulu pro řízení útlumu optického signálu. Přínos tohoto zařízení pro telekomunikační aplikace je zejména v možnosti srovnání výkonových úrovní u systémů využívajících hustý vlnový multiplex, nebo ke stabilizaci kolísajících výkonových úrovní některých zdrojů optického signálu. Další využití najdou tyto moduly v úpravě výkonu optického signálu za účelem snížení bitové chybovosti způsobené saturací fotodetektorů.

Cílem práce je především :

- stanovení základních principů přenosu světelného paprsku optickým vláknem, popisem technologií k tomu používaných a jevů, které na přenášený paprsek působí.
- rozbor konstrukce a vlastností útlumových článků používaných k telekomunikační technice, a to jak fixních, tak laditelných variant.
- měření vlastností vybraných laditelných útlumových článků.
- výběr vhodného řešení pro konstrukci samostatného modulu pro řízení optického útlumu a návrh jeho konstrukce.
- konstrukce prototypu modulu pro řízení útlumu optického signálu.
- otestování modulu a srovnání s komerčním řešením

# 1 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

## 1.1 Optické vlákno jako přenosové médium

Přenos dat optickým vláknem funguje na principu lomu světelného paprsku na rozhraní dvou různých optických prostředí. Tento jev je popsán fyzikální veličinou *index lomu*. Absolutní index lomu je vztažen k vakuu. Udává, kolikrát je velikost rychlosti světla v daném prostředí menší než velikost rychlosti světla ve vakuu.

$$n = \frac{c_0}{v} \quad (1.1)$$

kde:

$v$	rychlost světla v daném prostředí
$c_0$	rychlost světla ve vakuu

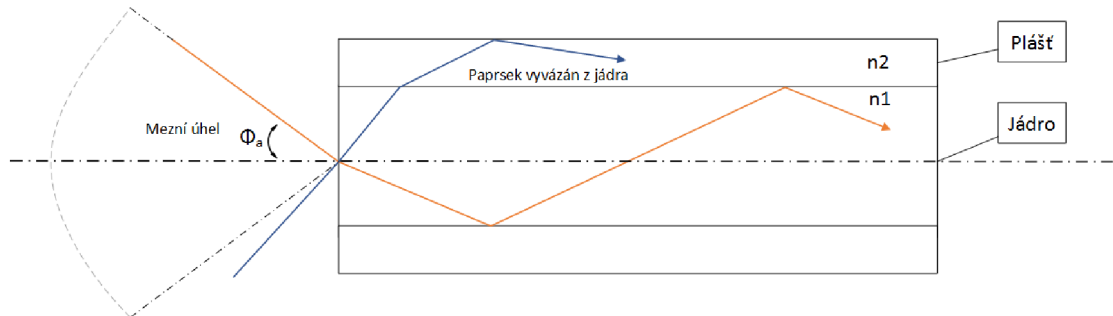
Optické vlákno je ve své podstatě válcový dielektrický vlnovod, jehož střed je tvořen jádrem, určeným k přenosu paprsku. Jádro o indexu lomu  $n_1$  je uloženo ve vnějším obalu - plášti s nižším indexem lomu  $n_2$ . Na rozhraní jádra a pláště dochází díky rozdílným indexům lomu k totálnímu odrazu části paprsků navázaných do vlákna. Druhá část, svírající s osou vlákna větší, než mezní úhel  $[\Theta_a]$  se částečně láme a přenášený výkon ztrácí při každém odrazu do obalu. Tento mezní úhel je dán složením optického rozhraní, konkrétněji poměrem numerických apertur obou materiálů. Mezní úhel vyjadřuje Numerická Apertura (NA) jejíž matematické vyjádření 1.2 vychází ze Snellova zákona lomu.

$$NA = \sin \Theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.2)$$

kde:

$n_1$	index lomu jádra
$n_2$	index lomu pláště
$\Theta_a$	maximální úhel, pod kterým lze navázat paprsek do vlákna

Struktura optického vlákna a lom paprsku v něm jsou znázorněny na obrázku 1.1.

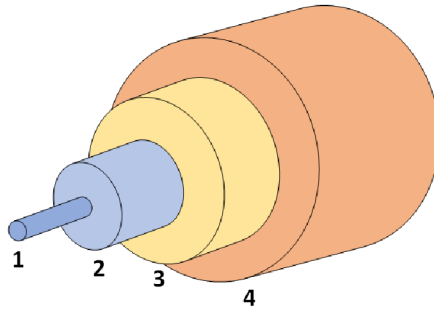


Obr. 1.1: Grafické znázornění struktury optického vlákna a šíření paprsku vláknem

Ideální optické vlákno je kruhově symetrické v celé délce, optická vlna se v něm šíří ve dvou ortogonálních rovinách. Index lomu obou rovin je shodný  $n_x = n_y$ , a proto i konstanty šíření jsou pro obě roviny totožné  $\beta_x = \beta_y$ . Reálné vlákno však ideálně symetrické není, a indexy lomu se v obou rovinách mírně liší. Proto i konstanty šíření nejsou pro obě roviny totožné. Tento jev má přímý vliv na vidovou disperzi, a tím i na útlum vlákna.

## 1.2 Struktura a druhy optických vláken

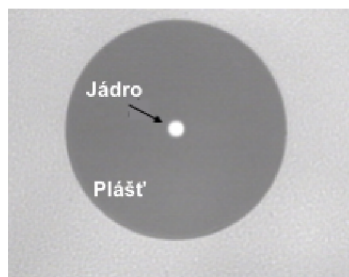
Pro účely telekomunikačních aplikací se nejčastěji využívá oblast optického záření 400 - 1700 nm. Proto jsou ke konstrukci optických vláken využívány materiály vykazující v tomto pásmu co nejnižší útlum a zkreslení signálu. Nejvhodnější pro konstrukci optického vlákna je zpravidla křemenné sklo, plast, nebo kombinace těchto materiálů. Fyzicky se optické vlákno skládá z několika základních prvků. Řez vláknem je znázorněn na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Řez optickým vláknem [1-jádro (core), 2-plášť (cladding), 3-ochrana (rating), 4-volitelný obal proti mechanickým vlivům]

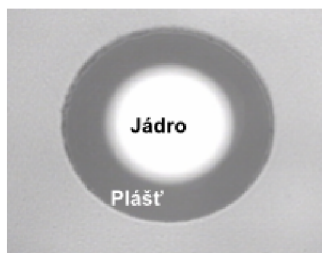
Jádro je nejdůležitější součástí optického vlákna, slouží k vlastnímu přenosu světelného paprsku. Průměr jádra závisí na druhu kabelu. Běžné průměry jader jsou 9  $\mu\text{m}$ , 50 a 62,5  $\mu\text{m}$ . Plášť zajišťuje hlavní ochranu a zpevnění jádra. Jeho index lomu je oproti jádru nižší  $n_2 < n_1$ . Běžně používaná vlákna mají průměr jádra 125  $\mu\text{m}$ . Primární ochranu tvoří většinou vrstva plastu nebo akrylátového laku. Výsledná tloušťka vlákna s primární ochranou je okolo 250  $\mu\text{m}$ . Pro běžné použití je však vlákno dále chráněno sekundární ochranou. Sekundární ochrana je tvořena tvrdou plastickou hmotou (teflon, hyrtel, nylon), zpravidla o průměru 900  $\mu\text{m}$ . V kabelu je takto upravené vlákno chráněné ještě nejčastěji kevlarovým opředěním. Druhým typem je pak tzn. volná sekundární ochrana, která je tvořena dutinou 1 – 2 mm vyplněnou gelem (silikonovou směsí). Podle průměru jádra můžeme optická vlákna dělit na dva základní druhy - jednovidová - Single Mode (SM) a mnohovidová - Multimode (MM).

### Single Mode vlákno

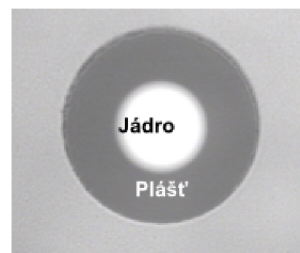


9/125 ( $\mu\text{m}$ )

### Multimode vlákna



62.5/125 ( $\mu\text{m}$ )

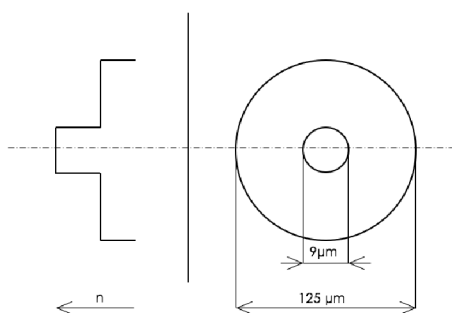


50/125 ( $\mu\text{m}$ )

Obr. 1.3: Typy vláken - řezy [7]

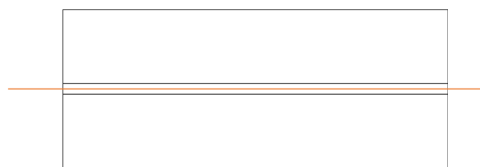
## 1.2.1 Single Mode vlákna

Jednovidové vlákno je konstruováno s malým poloměrem jádra, které vede pouze jediný vid. Díky tomu se u těchto vláken nevyskytuje vidová disperze, pouze chromatická a polarizační vidová. Jak je patrné z obrázku 1.4, jeho index lomu jádra je konstantní a index lomu pláště skokový. SM vlákna vyrobená ze skla mívají průměr jádra 9  $\mu\text{m}$  a numerickou aperturu v rozmezí 0,08 – 0,15. Malý průměr jádra zabraňuje vzniku vyšších vidů. Nejpoužívanějšími vlnovými délkami jsou v současnosti 1310-1580 nm k jejichž vyzařování je použit laser. Typický útlum jednovidových vláken je 0,35  $\text{dB km}^{-1}$  pro 1310 nm a 0,2  $\text{dB km}^{-1}$  pro 1550 nm. Jednovidová vlákna se zpravidla používají na delších trasách, řádově na desítky až stovky kilometrů.



Obr. 1.4: Průběh indexu lomu a řez single mode vláknem

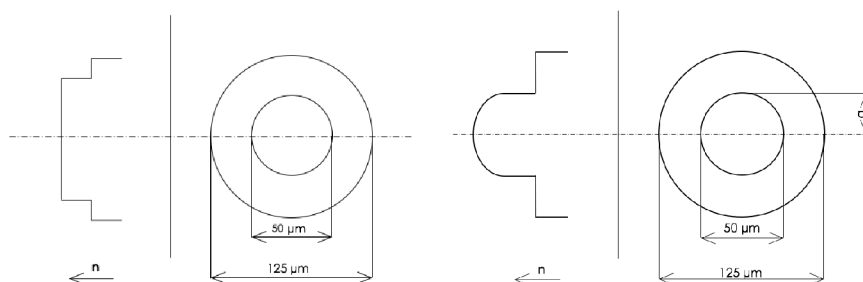




Obr. 1.5: Šíření vidu v single mode vlákne

## 1.2.2 Multi-Mode vlákna

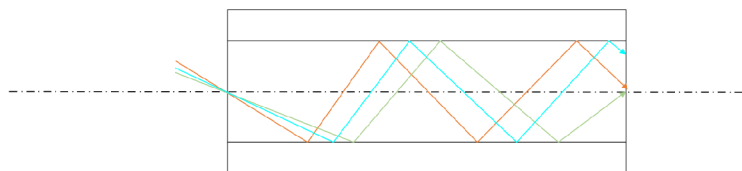
Mnohovidová vlákna běžně používají průměry jader 50 nebo 62,5  $\mu\text{m}$ . Větší průměr jádra umožňuje u těchto vláken šíření více vidů, důsledkem toho je vznik vidové disperze způsobující zkreslení signálu. Používané vlnové délky u MM jsou 850 a 1310 nm, díky vysoké numerické apertuře však nevyžadují natolik přesné zdroje záření, a proto se běžně využívají LED diody. Na druhou stranu mají tato vlákna vyšší útlum než vlákna typu SM, typicky 2-10  $\text{dB km}^{-1}$ , proto jsou využívány spíše na kratší vzdálenosti. U MM vláken rozlišujeme dle průběhu indexu lomu vlákna gradientní - Gradient Index (GI) a se skokovou změnou indexu lomu - Step Index (SI).



Obr. 1.6: Průběh indexu lomu a řezy step indexovým (vlevo) a gradientním (vpravo) vícevidovým vlákem

### Vlákno se skokovou změnou indexu lomu - SI

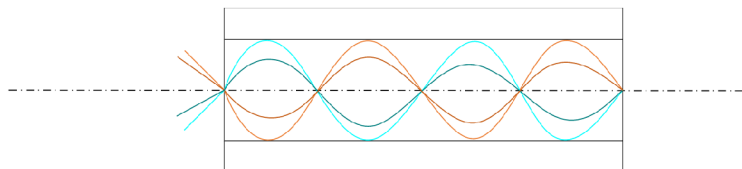
Struktura step index vlákna je patrná na obrázku 1.6. U těchto vláken je obvyklá numerická apertura 0,3-0,6. K jeho výhodám patří snadná výroba a tím daná nízká cena. Za nevýhody je považován vyšší útlum (5-30  $\text{dB km}^{-1}$ ), disperze a malá přenosová rychlost.



Obr. 1.7: Šíření vidů ve vícevidovém vlákně se skokovou změnou indexu lomu

### Vlákno gradientní - GI

Gradient index vlákna se vyznačují speciální úpravou profilu indexu lomu jádra. Na obrázku 1.6 je naznačen typický profil tohoto typu. Numerická apertura těchto vláken bývá v rozmezí 0,18-0,24. Paprsek procházející tímto vlákem kopíruje tvar kvadratické paraboly. Gradientní optická vlákna mají oproti vlákňům se skokovou změnou indexu lomu menší disperzi, nižší útlum ( $2,5-5 \text{ dB km}^{-1}$ ), ale jejich výroba je náročnější a dražší.



Obr. 1.8: Šíření vidů v gradientním vícevidovém vlákně

## 1.3 Útlum optických vláken

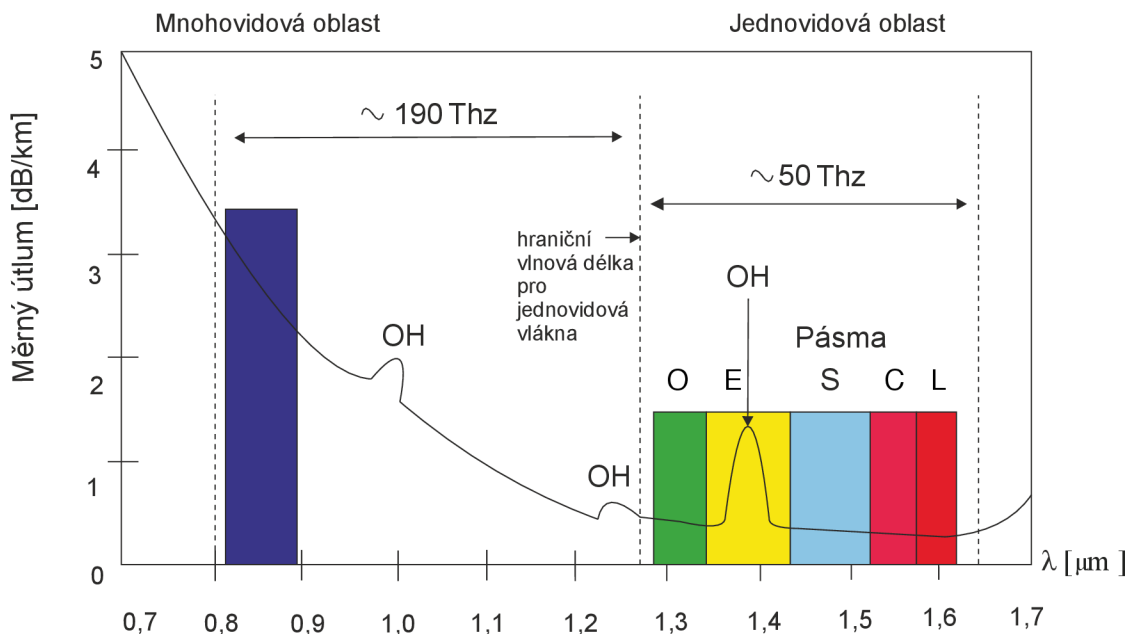
Se vzdáleností od zdroje záření optický výkon signálu ve vlákne postupně klesá. Útlum je měřítkem ztrát optické energie ve vlákne. Matematicky je vyjádřen jako poměr vstupního výkonu  $P_{in}$  [dBm] a výstupního výkonu  $P_{out}$  [dBm].

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad [\text{dB}] \quad (1.3)$$

U optických vláken je zejména důležitý měrný útlum  $\alpha$  tj. útlum vztažený k určité délce vlákna. Dnes používaná telekomunikační vlákna dosahují útlumu  $0,2 \text{ dB km}^{-1}$  pro vlnové délky  $1550 \text{ nm}$ . Útlum optických vláken je především způsobován [1]:

- absorpcí prostředí, v němž se energie záření šíří
- vyzařováním z vlákna
- rozptylem na nehomogenitách

Na obrázku 1.9 je znázorněna typická křivka spektrální závislosti měrného útlumu optického vlákna.



Obr. 1.9: Útlumová charakteristika optického vlákna [2]

### 1.3.1 Ztráty absorpcí

Absorpce je způsobena pohlcením části optického záření atomy materiálu jádra  $\text{SiO}_2$ , dalšími příměsemi a nečistotami z výroby vlákna. Ionty kovů Fe, Cu, Cr a OH ionty vody při určitých kmitočtech způsobují rezonanci tepelné ztráty ve vlákne.

Dnes používaná vlákna mají velmi nízký obsah nečistot, běžně pod 2 ppm [15], proto je u nich vliv ztrát absorpcí do značné míry zanedbatelný.

### 1.3.2 Ztráty rozptylem

Ke ztrátám rozptylem dochází kvůli mikronehomogenitám vzniklým při výrobě vlákna. Tyto nehomogenity způsobují lokální změnu indexu lomu. Rozlišujeme rozptyl Rayleighův a Mieův. Z těchto dvou je dominantní rozptyl Rayleighův, který sám o sobě způsobuje více než 90% celkového útlumu optického vlákna. Je charakteristický tím, že je všesměrový.

### 1.3.3 Ztráty vyzařováním

Ztráty vyzařováním jsou způsobeny převážně ohyby vlákna, při kterých dochází ke změně úhlu dopadu a odrazu. Pokud paprsek překročí mezní hodnotu úhlu odrazu, je vyvázan z jádra do pláště optického vlákna. Minimální poloměr ohybu vlákna je závislý na průměru optického vlákna a jeho jádra. Typicky by neměl být poloměr ohybu menší než 200-600 násobek poloměru skleněného vlákna [7]. Dalšími původci ztrát vyzařováním mohou být makroskopické neregularity ve vlákne, například bubliny nebo poruchy ve tvaru jádra. Kritický poloměr ohybu je pro MM vlákna definován vztahem [13]:

$$R_c \cong \frac{3 \cdot n_1^2 \cdot \lambda}{4\pi \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} \quad (1.4)$$

kde:

$n_1$	index lomu jádra
$n_2$	index lomu pláště
$\lambda$	vlnová délka

Pro tato vlákna typicky kritický poloměr dosahuje hodnoty  $R_c \cong 10^9 \mu\text{m}$ . V praxi před dosažením tohoto poloměru dojde k prasknutí vlákna.

Pro vlákna typu SM [13] je kritický poloměr definován vztahem:

$$R_{cs} \cong \frac{20\lambda}{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}} \cdot \frac{1}{2,748 - 0,996 \cdot \frac{\lambda}{\lambda_c}} \quad (1.5)$$

kde:

$n_1$	index lomu jádra
$n_2$	index lomu pláště
$\lambda$	vlnová délka
$\lambda_c$	mezní vlnová délka

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{V} a \cdot \text{NA} \quad (1.6)$$

kde:

NA	numerická apertura vlákna
V	Normálová frekvence
a	průměr jádra

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot \text{NA} \quad (1.7)$$

kde:

NA	numerická apertura vlákna
a	průměr jádra
$\lambda$	vlnová délka

Kritický poloměr vláken typu SM  $R_{cs} \cong 10^9 \text{mm}$  je běžně dosažitelná hodnota, se kterou je nutné u tohoto druhu vláken počítat.

### 1.3.4 Ztráty při navazování paprsku mezi vlákny

#### Odchylka rozdílů průměrů vláken

K útlumu dochází spojením dvou vláken s rozdílným průměrem. Vložný útlum tohoto spoje lze vyjádřit vztahem [1]:

$$a_d = -10 \log \left( \frac{d_R}{d_T} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (1.8)$$

kde:

$d_T, d_R$  průměry navazovaných vláken na vysílací a přijímací straně

#### Odchylka velikosti Numerické Apertury vláken

Vlákno na přijímací a vlákno na vysílací straně mají rozdílnou numerickou aperturu (NA). Útlum spoje lze spočítat následovně [1]:

$$a_{NA} = -10 \log \left( \frac{\text{NA}_R}{\text{NA}_T} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (1.9)$$

kde:

$\text{NA}_T, \text{NA}_R$  numerické apertury vlákna na vysílací a přijímací straně

### Příčný posuv os vláken

Odchylkou v sousostí vláken dochází k vyvázání části paprsků do pláště navazujícího vlákna. Pro vlákno typu MM SI lze útlum vyjádřit vztahem [1]:

$$a_{OS} = -10 \log \left\{ 1 - \frac{8l}{3\pi r} \right\} \quad [\text{dB}] \quad (1.10)$$

kde:

$l$	odchylka mezi osami vláken
$r$	poloměr vlákna

Pro vlákno SM potom platí následující vztah [1]:

$$a_{OS} = -10 \log e^{\left(\frac{-l}{w_0}\right)} \quad [\text{dB}] \quad (1.11)$$

kde:

$l$	odchylka mezi osami vláken
$w_0$	průměr stopy dominantního vidu

$$w_0 = a \cdot \left( \frac{0,65 + 1,62V^{-1,5} + 2,88V^{-6}}{\sqrt{2}} \right) \quad (1.12)$$

kde:

$a$	<i>poloměr jádra</i>
$V$	normálová frekvence 1.7

### Úhlová odchylka

S rostoucím úhlem, který mezi sebou svírají protilehlé osy vláken se zvyšuje vložný útlum. Pro MM vlákna lze útlum vypočítat dle následujícího vzorce [1]:

$$a_{US} = -10 \log \left( 1 - \frac{8n \cdot \sin \Theta}{3\pi \cdot \text{NA}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.13)$$

kde:

NA	numerická apertura vlákna
$n$	index lomu prostředí
$\Theta$	úhel odchylky mezi vlákny

Pro vlákno SM potom platí následující vztah [1]:

$$a_{US} = -10 \log e^{-(T)^2} \quad [\text{dB}] \quad (1.14)$$

kde  $T$ :

$$T = \frac{n \cdot \pi \cdot w_0 \cdot \sin \Theta}{\lambda} \quad (1.15)$$

kde:

$n$	index lomu prostředí
$w_0$	průměr stopy dominantního vidu 1.12
$\Theta$	úhel odchyšky mezi vlákny
$\lambda$	vlnová délka

### Axiální posuv vláken

Mezerou mezi vlákny je vyvázána část výkonu optického signálu ven z vlákna, nebo je po průchodu mezerou navázána do pláště. Pro MM je útlum možné vyjádřit vztahem [1]:

$$a_{PS} = -10 \log \left( 1 - \frac{z \cdot \text{NA}}{2 \cdot r \cdot n} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.16)$$

kde:

$r$	poloměr vlákna
$n$	index lomu prostředí
NA	numerická apertura
$z$	vzdálenost mezi konci vláken

Pro SM vlákna potom platí vztah [1]:

$$a_{PS} = -10 \log \left( \frac{1}{S^2 + 1} \right) \quad (1.17)$$

kde  $S$ :

$$S = \frac{z \cdot \lambda}{2\pi \cdot n \cdot w_0^2} \quad (1.18)$$

kde:

$n$	index lomu prostředí
$\lambda$	vlnová délka
$z$	vzdálenost mezi konci vláken
$w_0$	průměr stopy dominantního vidu 1.12

## Ztráta odrazem

K útlumu odrazu dochází při zpětném (Fresnelovu) odrazu optického signálu od oblasti, která vykazuje odlišný index lomu. U navazovaných vláken vzniká rozhraní NA vlákno/vzduch/vlákno. Zpětně odražený signál může zvyšovat šum optického systému, nebo v případě koherentních zdrojů záření může způsobit přeladění na jinou vlnovou délku. Pro výpočet útlumu můžeme použít vztah pro koeficient odrazivosti [1]:

$$a_{RS} = -10 \log \left[ 1 - 2 \left( \frac{n_j - n_0}{n_j + n_0} \right)^2 \right] \quad [\text{dB}] \quad (1.19)$$

kde:

$n_0$	index lomu okolního prostředí
$n_j$	index lomu vlákna

Nebo metodou měření výkonu odraženého optického signálu:

$$ORL = 10 \cdot \log \frac{P_S}{P_{ref}} \quad [\text{dB}] \quad (1.20)$$

kde:

$ORL$	Útlum odrazu
$P_S$	Střední výkon vysílaného optického signálu
$P_{ref}$	Střední výkon odraženého optického signálu



## 1.4 Telekomunikační pásmo

Z útlumové charakteristiky optického vlákna (1.9) vychází jednotlivá pásma pro optický přenos v telekomunikačních aplikacích. Aktuálně používaná vlnová okna jsou uvedena v tabulce 1.1

Pásmo	Název	Rozsah [nm]	Použití	Typický útlum [dB km <sup>-1</sup> ]
M		850 – 950	MM, krátké vzdálenosti	3,0
O	Original	1260 – 1360	SM, původní pásmo, PON	0,33
E	Extended	1360 – 1460	SM, water peak	0,19
S	Short	1460 – 1530	SM, PON	0,22
C	Conventional	1530 – 1565	SM, původní DWDM	0,20
L	Long	1565 – 1625	SM, rozšířené DWDM	0,23
U	Ultra-long	1625 – 1675	SM, vysoké přenosové rychlosti	0,28

Tab. 1.1: Pásma vlnových délek používaná k telekomunikačním účelům

Při návrhu modulu pro řízení útlumu optického signálu se zaměříme především na pásmo 1530 – 1625nm využívané pro hustý vlnový multiplex - Dense Wavelength-Division Multiplexing (DWDM).

## 1.5 Disperze v optických vláknech

Disperzní jevy jsou hlavní příčinou zkreslení přenášeného signálu, proto jsou také důležitým parametrem optických vláken. Nezpůsobují útlum, ale rozprostírají signál v čase a způsobují změny jeho geometrie. Zkreslení signálu pak ovlivňuje použitelnou šířku přenášeného pásma a tím i přenosovou rychlost. Druhy disperze se odvíjejí od použitého typu vlákna. Vidová disperze se projevuje pouze u MM vláken, polarizační a chromatická disperze se pak projevuje převážně v SM vláknech. Pro matematický popis disperzí je nutné zavést veličiny fázová a skupinová rychlost šíření.

### 1.5.1 Fázová rychlost šíření

Fázová rychlost je rychlost, s jakou se pohybuje fáze vlnění prostorem. Není svázána s rychlostí přenosu energie, proto může nabývat hodnot vyšších, než je rychlost světla ve vakuu  $c_0 = 3 \times 10^8$  m/s. Její matematické vyjádření je [1]

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{c_0}{n} \quad (1.21)$$

kde:

$\omega$	úhlová frekvence
$k$	vlnový vektor
$n$	index lomu

### 1.5.2 Skupinová (grupová) rychlost šíření

Skupinová (grupová) rychlost popisuje přenos energie vlněním. Skupina je tvořena větším počtem harmonických vln. Přenosem energie se mohou šířit signály, proto skupinová rychlost nemůže být větší než rychlost světla ve vakuu  $c_0$ . Velikost skupinové rychlosti můžeme určit ze vztahu [1]

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_0}{n_s} \quad (1.22)$$

kde:

$n_s$	skupinový index lomu
-------	----------------------

$$n_s = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (1.23)$$

### 1.5.3 Vidová disperze

Vidová disperze se projevuje pouze u vícevidových vláken. Kvůli nestejně dlouhým drahám, které musí paprsek v jádru vlákna překonat dochází k roztažení paprsku v čase. „Čím je úhel mezi trajektorií paprsku s osou světlovodu větší (čím vyšší vid), tím je delší jeho dráha mezi vstupem a výstupem světlovodu a jeho podélná rychlost ve směru osy světlovodu je menší.“ [1] Vidová disperze je částečně potlačena použitím vláken s gradientním indexem lomu, u SM vláken je pak zcela zanedbatelná.

### 1.5.4 Chromatická disperze

Chromatická disperze - Chromatic Dispersion (CD) vzniká součtem dvou dílčích složek, a to materiálové a vlnovodné disperze. Význam má u jednomodových vláken, protože u vícevidových se dříve projeví disperze vidová. Materiálová disperze je způsobena závislostí indexu lomu na vlnové délce. Používané zdroje záření nejsou ideálně monochromatické, proto se vláknem šíří paprsek o určitém spektru vlnových délek. Každá ze složek tohoto spektra se vláknem šíří rozdílnou rychlostí a dorazí tedy na konec v jiném časovém okamžiku. U standartních SM vláken je chromatická disperze nulová v oblasti okolo 1300 nm. Materiálovou disperzi je možné popsat disperzním koeficientem  $D(\lambda)$  definovaným [8]:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad [\text{ps nm}^{-1} \text{ km}] \quad (1.24)$$

kde:

$n$	index lomu prostředí
$c$	rychlost světla v daném materiálu

Vlnovodnou disperzi způsobuje šíření části paprsku v plášti vlákna. Plášť vlákna má nižší index lomu než jádro, proto se paprsek jím vedený pohybuje vyšší rychlostí. Rozdíly v indexu lomu obou materiálů jsou poměrně malé, proto je vlnovodná disperze měřitelná až na velké vzdálenosti. Koeficient chromatické disperze zahrnující obě složky (materiálovou i vlnovodnou) lze vyjádřit vztahem [8]:

$$D_{chr} = c_0 \cdot f \cdot \frac{d\tau_s}{df} \quad [\text{ps nm}^{-1} \text{ km}] \quad (1.25)$$

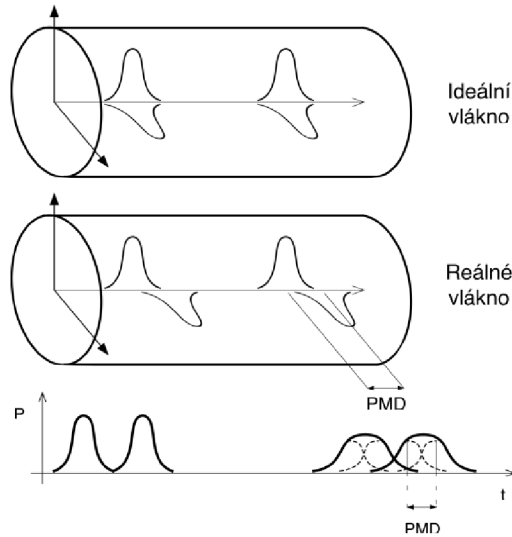
kde:

$c_0$	rychlost světla ve vakuu
$\tau_s$	skupinové zpoždění

CD může být jak kladná, tak i záporná. Je možné ji kompenzovat za použití speciálních typů vláken se zápornou disperzí, nebo za použití Braggových mřížek.

### 1.5.5 Polarizační vidová disperze

Světelný signál se v jednomodovém optickém vlákne šíří ve dvou navzájem kolmých polarizačních rovinách. Díky kruhové nesymetrii indexu lomu optického vlákna se oba polarizační vidy šíří jinou rychlostí. Dochází tedy k rozšíření impulzu na konci vlákna. PMD má oproti jiným typům poměrně malou velikost, stává se důležitou až u rychlostí nad 2,5 Gb/s. K PMD musíme přistupovat jako k náhodnému jevu, její velikost nelze určit matematickým výpočtem jako v případě chromatické disperze.



Obr. 1.10: Vliv PMD na signál ve vlákne [7]

## 1.6 Metody měření útlumu

Útlum optického vlákna vždy měříme mezi dvěma body (vstupem a výstupem) podle matematického vztahu 1.3. Pro měření můžeme využít několik měřících metod:

- Metody přímé
  - Metoda dvou délek (Cut Back)
  - Metoda vloženého útlumu (Insertion Loss)
- Metody nepřímé
  - Metoda zpětného rozptylu (Optical Time Domain Reflectometry (OTDR))

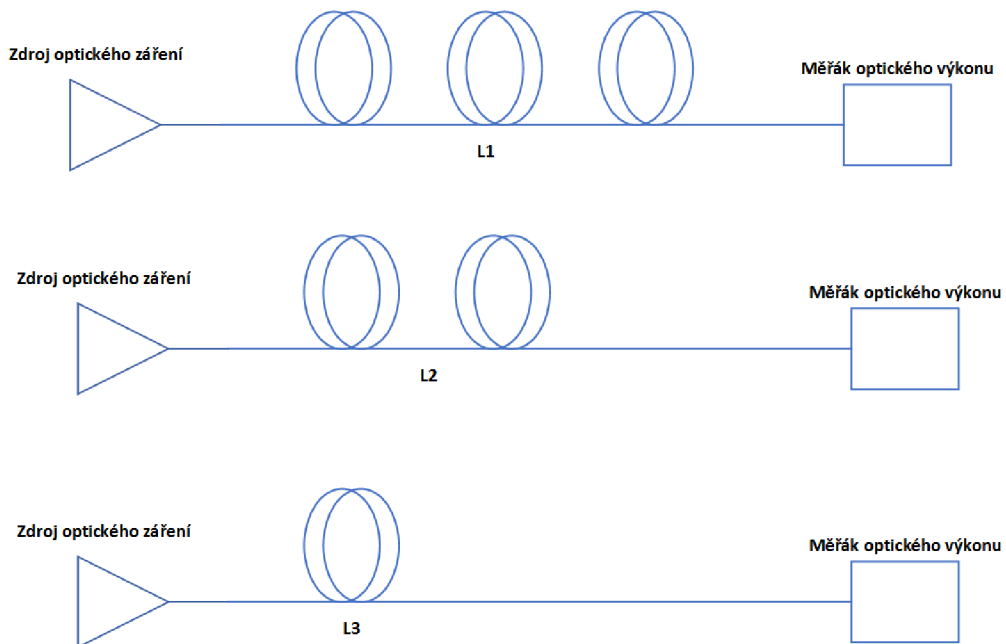
### 1.6.1 Metoda dvou délek

Metoda dvou délek je nejpřesnější a zároveň považována za referenční [1]. Spočívá v měření optického výkonu pro různé délky optického vlákna. Využívá stabilizovaný zdroj optického signálu a měřič výkonu. V praxi není příliš rozšířená z důvodu destrukce krácením vlákna. Pokud měříme výstupní výkon  $P_1$ ,  $P_2$  a  $P_3$  na délkách vlákna  $L_1$ ,  $L_2$  a  $L_3$ , pak lze útlumový koeficient  $\alpha$  vypočítat ze vztahu:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{L_1 - L_2} \quad [\text{dB}] \quad (1.26)$$

nebo

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{P_2}{P_3}\right)}{L_2 - L_3} \quad [\text{dB}] \quad (1.27)$$



Obr. 1.11: Měření útlumu metodou dvou délek

### 1.6.2 Metoda vložného útlumu

Metoda vložného útlumu pracuje podobně jako metoda dvou délek se stabilizovaným zdrojem optického signálu a měřičem výkonu. Měření probíhá ve dvou krocích, v prvním je změřena referenční hodnota útlumu s krátkým propojovacím kabelem (cca 2m) stejného typu jako na měřené trase. Tím získáme referenční výkon  $P_{ref}$ . Ve druhém kroku je referenční vlákno nahrazeno vláknem měřené trasy, odtud získáme hodnotu  $P_{trasa}$ . Celkový útlum trasy je pak dán vztahem:

$$A = P_{ref} - P_{trasa} \quad [\text{dB}] \quad (1.28)$$

### 1.6.3 Metoda zpětného rozptylu

OTDR je založeno na principu Rayleighova rozptylu. Měřicí přístroj vysílá do vlákna úzký optický impuls a zároveň měří zpětnou odezvu. Při vyhodnocení je pak vynešena časová závislost zpětného rozptylu tohoto impulsu, ze které lze určit přibližný vložený útlum trasy, a zejména polohu konektorových spojů nebo poruch na vlákně.

## 1.7 Zdroje optického záření

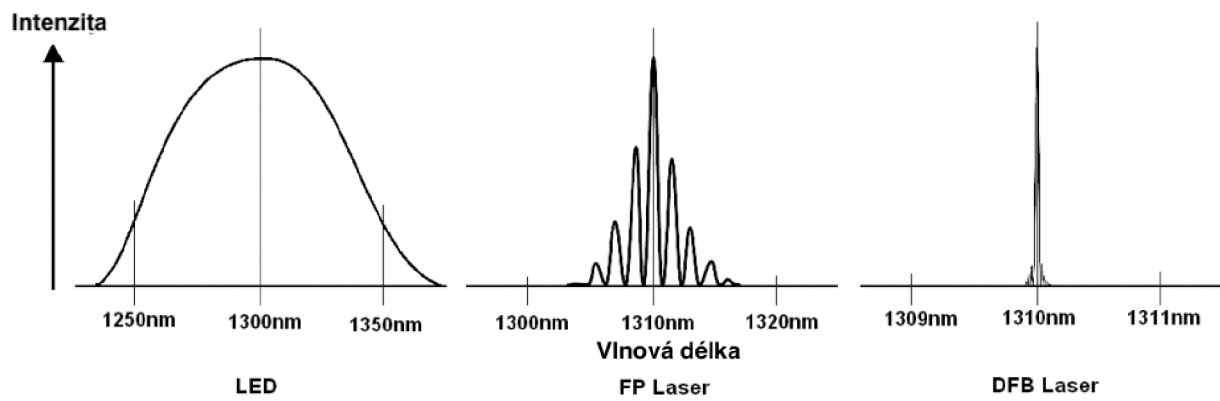
V telekomunikační technice se používají převážně 2 typy zdrojů záření, a to Laserové a LED zdroje. Jejich hlavními rozdíly jsou spektrální šířka, nebo prostorová vyzařovací charakteristika.

### 1.7.1 LED zdroje

Světlo vyzařující diody - Light Emitting Diode (LED) se vyznačují poměrně velikou šířkou spektrálního pásma, nehodí se proto například pro spoje využívající vlnový multiplex - Wavelength-Division Multiplexing (WDM). LED zdroje jsou založené na polovodičovém PN přechodu převážně na bázi *GaAs* pro vlnové délky 850 nm, tedy pro použití s MM vlákny. Druhým typem jsou LED založené na *InGaAsP* vyzařující na vlnové délce 1300 nm, vhodné pro použití jak s MM tak SM vlákny. Existují dva typy konstrukce, a to diody s čelním vyzařováním, nebo diody s vyzařováním z hrany. Diody s vyzařováním z hrany se vyznačují menší šířkou vyzařovaného spektra a vyšším výkonem.

### 1.7.2 LASERové zdroje

Polovodičové Laserové diody - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LD) jsou založeny na principu stimulované emise. Skládá se z polovodičového zesilovače s PN přechodem, opatřeného optickou zpětnou vazbou. Zpětná vazba je vytvořena zrcadly, která se obvykle získávají štípáním polovodičového materiálu podél krystalových ploch [7]. Podobně jako LED, materiály PN přechodu jsou převážně *GaAs* a *InGaAsP*. Běžně využívané typy laserových diod jsou FP (Fabry-Perot), DFB (Distributed Feedback) nebo VCSEL (plošně vyzařující lasery). Oproti LED se LD vyznačují až 1000x užším spektrem než LED (viz. 1.12), což umožňuje využití více kanálů ve vláknech. K dalším výhodám patří vyšší vyzařovací výkon a vyšší účinnost vazby paprsku do vlákna. Na druhou stranu vyžadují vyšší napájecí napětí a teplotní stabilizaci. Polovodičové lasery jsou zdrojem koherentního záření, jejich spektrum však není nekonečně úzké.



Obr. 1.12: Srovnání spektrální charakteristiky LED (vlevo) s Laserovými zdroji FP (uprostřed) a DFB (vpravo)

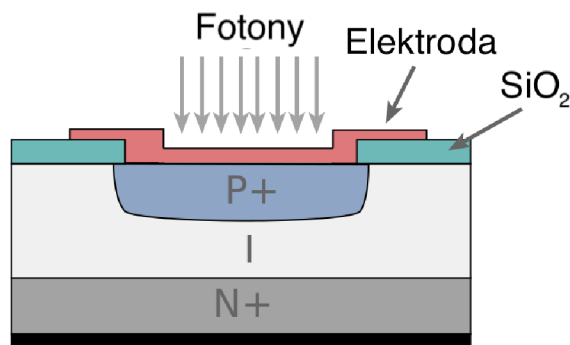


## 1.8 Fotodetektory

Fotodetektory měří optický výkon transformací energie absorbovaných fotonů do měřitelné formy, jakou je například změna impedance. K tomuto účelu jsou v telekomunikacích využívány polovodičové diody. Foton dopadající na přechod PN svojí energií vyváže elektron z valenčního pásu a ten přeskočí do pásu vodivostního. Na jeho místě vznikla díra. Takto vzniklé volné elektrony jsou volné nosiče náboje, které zvyšují elektrickou vodivost polovodiče. Materiály použité v PN přechodu se odvíjejí od vlnové délky, která má být fotodetektozem zpracována, nejčastěji se jedná o kombinace *GaAs*, *InGaAsP* a podobných sloučenin.

### 1.8.1 Fotodioda PIN

Nedostatkem PN fotodiody je, že šířka ochuzené vrstvy (aktivní oblast detekce optického záření) je malá. Přístupuje se proto k rozšíření ochuzené vrstvy, ta snižuje pravděpodobnost rekombinací nosičů náboje, čímž zvyšuje účinnost fotodiody. Takto upravené fotodiody se označují PIN. Princip uspořádání PIN diody spočívá v tom, že mezi silně dotované vrstvy typu P a N s velkou vodivostí je vložena slabě dotovaná (intrinzičná) vrstva I. V této oblasti je silné, rovnoměrně rozložené elektrické pole, které zvyšuje rychlost nosičů náboje a tím i mezní kmitočet diody. Zároveň rozšíření této vrstvy pomocí záporného předpětí zvětšuje plochu, která slouží k absorpci záření.



Obr. 1.13: Vnitřní struktura PIN diody s čelním dopadem záření [9]

Přechody vznikají jak v místě styku vrstev *P* a *I* tak *I* a *N*. Jak již bylo zmíněno, materiál PN přechodu má vliv na vlnovou délku kterou fotodioda přijímá. Má ale vliv i na další důležité parametry, jako je rychlost odezvy, nebo vlastní šum. Například křemíkové fotodiody vykazují nižší šum, než fotodiody založené na Germaniu [9].

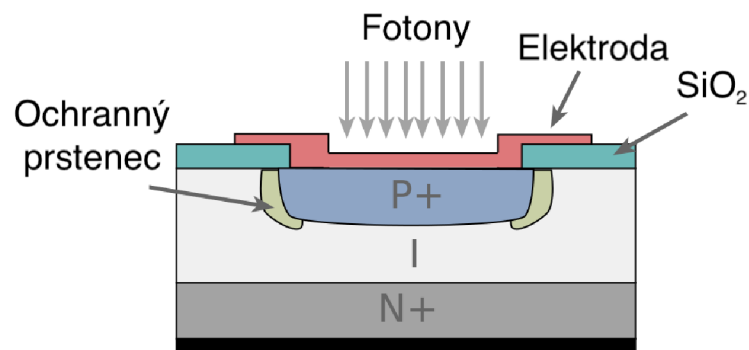
V tabulce 1.2 je přehled materiálů používaných ke konstrukci PIN fotodiod s vlnovými délkami pro které jsou využívány.

Materiál (název v anglickém jazyce)	vlnová délka [nm]
Germanium	800-1700
Indium gallium arsenide	800-2600
Lead sulphide	1000-3500
Silicon	190-1100

Tab. 1.2: Materiály PIN fotodiod

### 1.8.2 Lavinová fotodioda APD

Lavinové fotodiody vykazují řádově vyšší citlivost než diody typu PIN. V ochranném prstenci APD fotodiod se pracuje s vysokým napětím ve zpětném směru, které vytváří silné elektrické pole, kterým jsou nosiče urychlovány a získávají energii způsobující lavinovou excitaci nových nosičů nárazovou ionizací. Používané materiály se prakticky neliší od typu PIN. Nevýhodou APD fotodiod je požadavek vysokého předpětí a díky vyšší citlivosti bohužel i zvýšená úroveň šumu.



Obr. 1.14: Vnitřní struktura APD diody s čelním dopadem záření [9]

## 1.9 Optický útlumový článek

Optický útlumový článek (atenuátor) je pasivní prvek optické sítě, který má za úkol snížit úroveň výkonu optického signálu bez vlivu na jeho spektrum nebo tvar. Využívá se k tomu principu absorpce, reflektance, difuze, rozptylu, deflekce nebo difrakce optického paprsku. Každá z metod útlumu má své výhody a nevýhody dané například závislostí na vlnové délce nebo rozložení vidů. Snížení přijímaného výkonu je žádoucí v případech, kdy dochází k saturaci fotodiody přijímače nebo vzniku šumu, tím také narůstá bitová chybovost - Bit Error Rate (BER). Útlumové články také nachází uplatnění v systémech využívajících DWDM, v těch je žádoucí srovnat výkonové úrovně všech optických signálů na stejnou hladinu. Dalším využitím je ochrana citlivých fotodetektorů, jakými jsou APD fotodiody před poškozením optickým signálem s vysokou intenzitou. U MM vláken díky celkově nižším optickým výkonům není útlumových článků zapotřebí. V telekomunikacích využívané útlumové články rozlišujeme na fixní a laditelné optické attenuátory - Variable Optical Attenuator (VOA).

### 1.9.1 Fixní

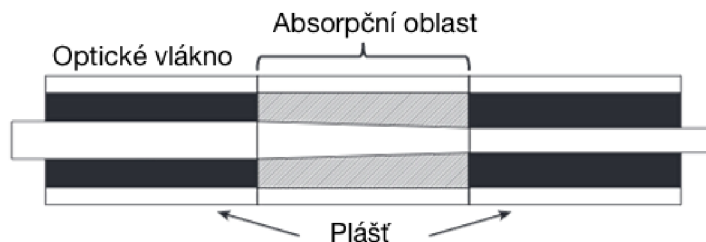
Fixní optické útlumové články mají už podle svého názvu pevně danou úroveň útlumu, uváděnou v dB. Existují ve dvou provedeních. In-line, ve formě optického patch kabelu s konektory na obou koncích, nebo konektorový typ ve formě přechodky z konektoru typu samec na typ samice.



Obr. 1.15: Útlumový článek in-line (vlevo) a konektorový typ (vpravo)

### Absorpční

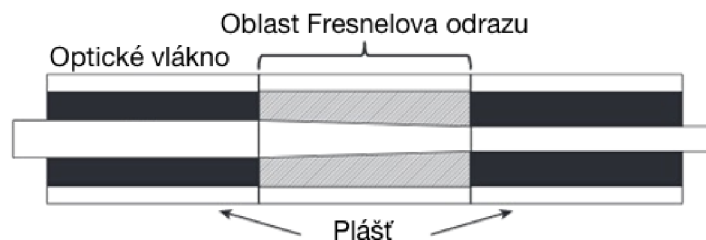
V absorpčních útlumových člancích je snížení optického výkonu dosaženo cíleným zanesením nepřesností nebo nečistot do vlákna. Tyto neregularity absorbují optický výkon, tím dochází k jejich zahřívání. Absorpční attenuátory proto nejsou vhodné pro systémy s vysokým vyzařovacím výkonem. Jejich výhodou je naopak zanedbatelný vliv na polarizaci optického paprsku.



Obr. 1.16: Princip Absorpčního útlumového článku [11]

### Reflektivní

V reflektivních útlumových člancích se dosahuje snížení optického výkonu materiály se známou hodnotou Fresnelova odrazu. Tyto materiály jsou umístěny do cesty optického paprsku v paralelním uspořádání pod úhlem, který umožňuje dostatečnou separaci odražených paprsků. Alternativně je možné použít hranol bez paralelních povrchů.

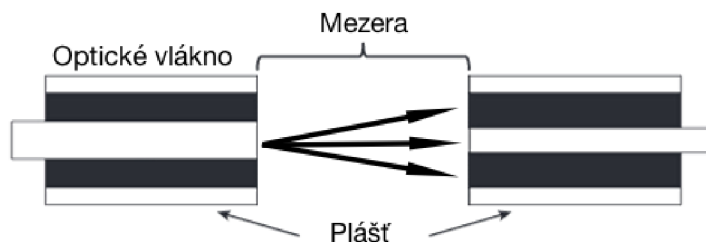


Obr. 1.17: Princip Reflektivního útlumového článku [11]

Díky odrazu paprsků nedochází k zahřívání reflektivního útlumového článku. Jsou proto vhodnější pro tlumení signálů s vyšším optickým výkonem. Jejich nevýhodou je naopak vliv na polarizaci optického paprsku. Ta je závislá na úhlu dopadu paprsku na reflektivní materiál.

### Fixní Gap-Loss

V útlumové články typu Gap-Loss pracují s axiálním posuvem vláken. Jak je patrné ze vzorců 1.17 a 1.18, útlum axiálním posuvem SM vláken je závislý na vlnové délce přenášeného paprsku, proto není tento typ útlumových článků příliš vhodný pro použití se SM vlákny. K zajištění jejich korektní funkcionality je třeba útlumové články umístit co nejbližší ke zdroji optického záření z důvodu jejich citlivosti na rozložení vidů ve vlákne [11].



Obr. 1.18: Princip útlumového článku Gap-Loss [11]

Jejich nevýhodou je vznik zpětných odrazů, které mohou způsobovat šum, nebo mít jiné nežádoucí vlivy. (viz. kapitola 1.3.4).

## 1.9.2 Variabilní

Variabilní (laditelné) optické útlumové články jsou buď manuálně, nebo elektronicky řízené prvky optické sítě. Jsou určeny primárně pro testovací účely, kdy je třeba určit požadovanou úroveň signálu před nasazením fixního atenuátoru nebo pro různá měření. Laditelné útlumové články dovolují kontrolovaným způsobem dynamicky reagovat na poklesy nebo nárůsty výkonu na optické trase.

### Variabilní Gap-Loss

Stejně jako v případě fixních atenuátorů, nejjednodušším typem laditelných útlumových článků je typ založený na axiálním posuvu vláken. Posuv mezi vlákny je nastavitelný pomocí šroubovice, do které jsou obě strany upevněny.



Obr. 1.19: Laditelný útlumový článek založený na principu Gap-Loss[11]

Vlastnosti a nevýhody tohoto typu jsou shodné s jeho fixním protějškem (viz. kapitola 1.9.1).

## Útlum tvořený ohybem vlákna

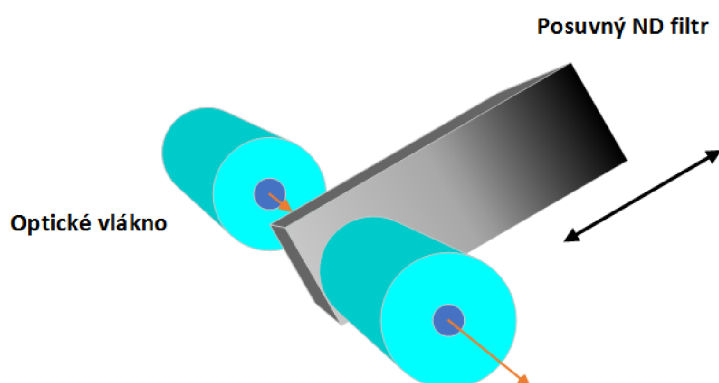
Útlum ohybem optického vlákna způsobují primárně ztráty vyzařováním, viz. kapitola 1.3.3. Vlákno může být navíjeno na válec s pevně daným průměrem menším, než je minimální poloměr ohybu daného vlákna, tím je vyvazována část paprsků do pláště. Pro zafixování konkrétní hodnoty útlumu existují speciální kazety, viz. obrázek 1.20. Jejich velkou výhodou je možnost vytvoření, nebo úpravy útlumu bez nutnosti rozpojení optické trasy. Nevýhodou je pak závislost na vlnové délce - pro každou vlnovou délku vykazují odlišnou úroveň útlumu (viz. kapitola 1.3.3). Další nevýhodou je nepřesnost, rozdílná vlákna vykazují při stejném úhlu ohybu rozdílný útlum.



Obr. 1.20: Kazeta pro zafixování konkrétní hodnoty útlumu ohybem [12]

## Variabilní ND filtr

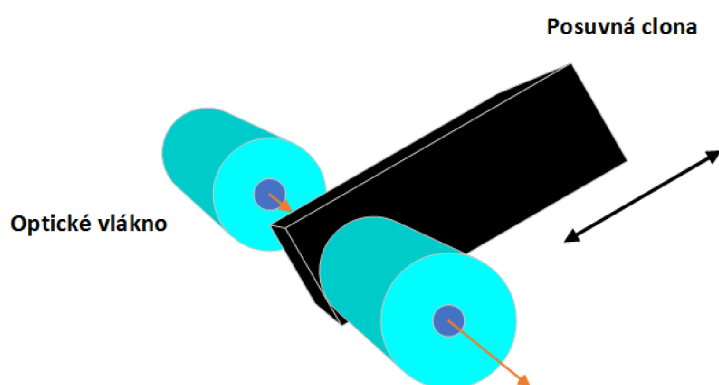
Neutrální filtr - Neutral Density filter (ND) je typ filtru, který vykazuje konstantní hodnotu útlumu pro určité spektrum vlnových délek. V případě variabilních útlumových článků se využívá tzv. přechodový ND filtr, který je zde ve formě gradientní desky s lineárně se zvyšujícím útlumem. ND filtr je upevněn v mechanismu poháněném servomotorem a je posunován do cesty optického paprsku. Je vhodný pro SM i MM aplikace, protože ND filtr vykazuje konstantní útlum pro všechny vlny.



Obr. 1.21: Princip funkce variabilního útlumového článku s ND filtrem

## Útlumový článek se clonou

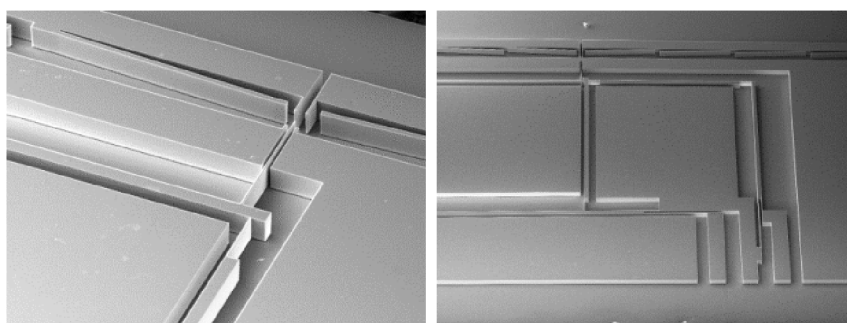
Útlumový článek s klapkou funguje na podobném principu jako útlumový článek s ND filtrem, ale místo filtru je do cesty paprsku pomocí servomotoru posunována nepropustná clona. Tento typ atenuátoru vykazuje velmi dobrý dynamický rozsah útlumu, ale je vhodný spíše pro SM aplikace, kvůli větší odchylce útlumu pro různé vidy.



Obr. 1.22: Princip funkce variabilního útlumového článku se clonou

## Útlumový článek využívající MEMS

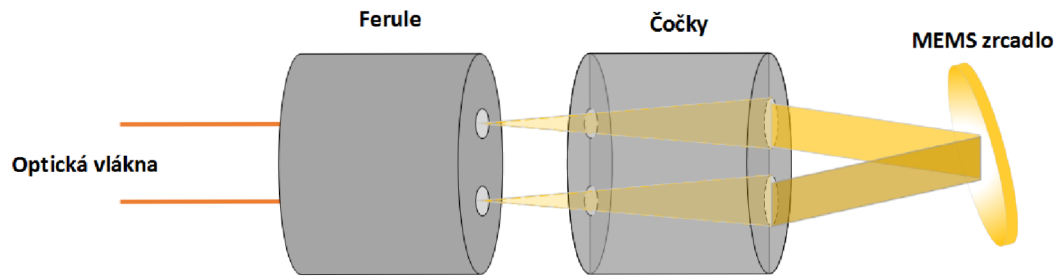
MikroElektroMechanické Systémy - MicroElectroMechanical Systems (MEMS) již dle svého názvu integrují na jediném čipu elektronické a mechanické prvky. V optických komunikacích se také často používá zkratka MOEMS, která přidává slovo „Optické“. MOEMS mohou na sobě integrovat například mikrozrcadla, mikročočky, optické modulátory a přepínače, mikrozávěrky a clony, nebo řadu dalších optických komponent. Pomocí MOEMS lze realizovat i vícecestavové optické aktivní členy, jakým jsou i VOA. Je možné využít mechanismu clony posunované do cesty optického paprsku pomocí elektroteplotních akčních členů, tedy mikroskopickou variantu útlumového článku se clonou 1.9.2.



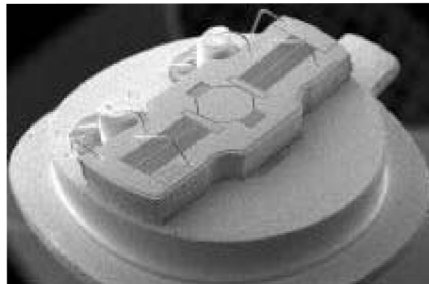
Obr. 1.23: Detail MOEMS struktury optického akčního členu VOA [14]



Běžně se však využívá spíše principu jednoosého kolimačního zrcadla, které odráží paprsek vstupního vlákna do vlákna výstupního. Úroveň útlumu je určena úhlem naklonění zrcadla, kterým je část světelného paprsku odkloněna mimo výstupní vlákno. Princip funkce tohoto útlumového článku je na obrázku 1.24.



Obr. 1.24: Princip funkce variabilního útlumového článku MEMS



Obr. 1.25: Detail struktury MEMS jednoosého zrcadla [11]

Oproti jiným typům atenuátorů se MEMS vyznačují nízkou závislostí na vlnové délce i polarizaci. K jejich dalším výhodám také patří vysoká přesnost, malé rozměry a nízká spotřeba [11].

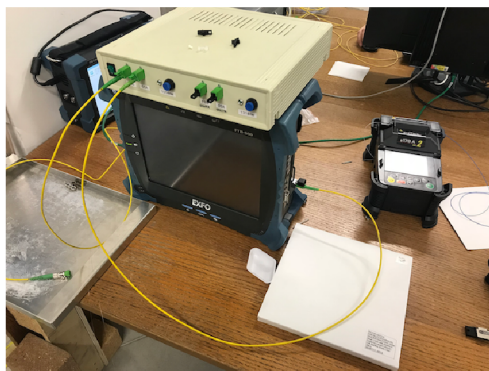


## 2 MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍCH VLASTNOSTÍ VARIABILNÍCH OPTICKÝCH ÚTLUMOVÝCH ČLÁNKŮ

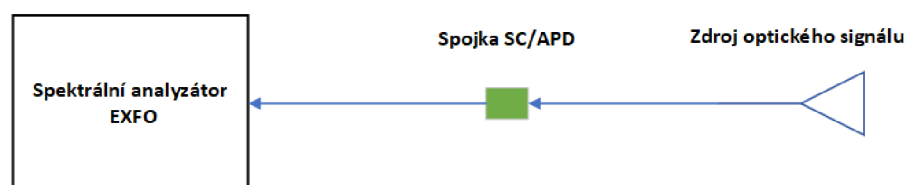
Za účelem výběru vhodného typu laditelného útlumového článku byla otestována spektrální závislost několika typů atenuátorů proti referenčnímu přístroji od firmy OZ Optics. Výsledky naměřené spektrálním analyzátozem EXFO FTB-500 za pomocí zdroje optického signálu využívajícího SLED diodu DL-CS3184A (Katalogový list A.10) pro vlnové délky od 1290 do 1330 nm se střední vlnovou délkou 1310 nm a širokopásmový optický ASE zdroj HY-ASE-C-G-13-M-FA (Katalogový list A.11) pro vlnové délky 1527-1565 nm se střední vlnovou délkou 1546 nm. Měřena byla závislost útlumu  $a$  na vlnové délce  $\lambda$  u fixních útlumových článků SM LC/APC, přístroje Digital Variable Attenuator od firmy OZ Optics a MEMS VOA útlumového článku připojeného na stabilizovaný zdroj Diametral P130R51D.

## 2.1 Spektrum testovacího zdroje optického signálu

Nejprve bylo provedeno referenční měření spektra obou zdrojů optického signálu, jak 1310 nm SLED tak 1550 nm ASE zdroje.



Obr. 2.1: Měřící pracoviště



Obr. 2.2: Zapojení měřících přístrojů

Graf spektra pro vlnové délky 1250- 1400 nm se nachází v příloze A.1. Jde o spektrum typické pro SLED zdroj optického signálu shodující se s katalogovým listem poskytovaným výrobcem (při uvážení vloženého útlumu konektorů).

Graf spektra pro vlnové délky 1518 - 1575 nm se nachází v příloze A.2. Jedná se o typický širokospektrální ASE zdroj, jehož spektrum opět odpovídá katalogovému listu poskytovanému výrobcem (při uvážení vloženého útlumu konektorů).

## 2.2 Měření spektrální závislosti fixních útlumových článků

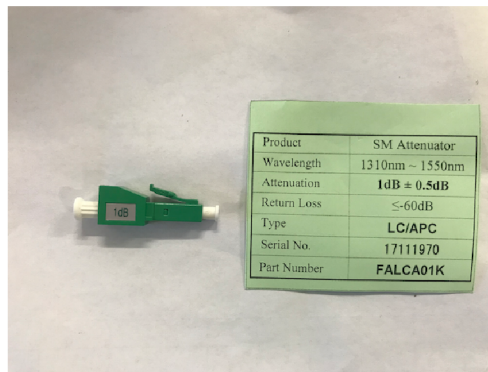
Pro srovnání s laditelnými útlumovými články bylo provedeno měření dvou fixních atenuátorů s útlumy 1 dB a 2 dB. Výsledky jsou vztaženy k referenčnímu měření spektra optického zdroje, viz. kapitola 2.1.

$$\text{Útlum} = P_{ref} - P_{att} \quad [\text{dB}] \quad (2.1)$$

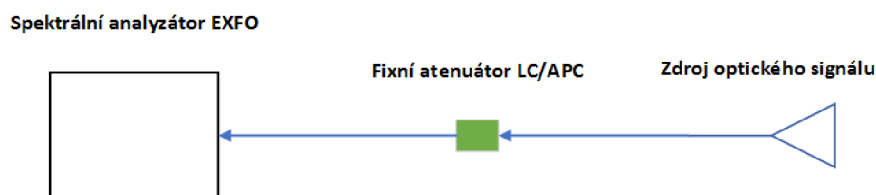
kde:

$P_{ref}$  Naměřený referenční výkon optického zdroje bez útlumu

$P_{att}$  Naměřený výkon se zapojeným útlumovým článkem



Obr. 2.3: Fixní atenuátor LC/APC o útlumu 1 dB



Obr. 2.4: Zapojení měřících přístrojů

Graf spektra pro vlnové délky 1250- 1400 nm přiložen v příloze A.3. U vlnových délek 1250 - 1400 nm nedošlo k výraznému zkreslení spektra, což bylo dle nízkých hodnot útlumu a typu použitých atenuátorů očekáváno.

Graf spektra pro vlnové délky 1518 - 1575 nm přiložen v příloze A.4. U vlnových délek 1518 - 1575 nm nedošlo k výraznému zkreslení spektra, což bylo dle nízkých hodnot útlumu a typu použitých atenuátorů očekáváno.

## 2.3 Měření spektrální závislosti laditelného útlumového článku OZ Optics

OZ Optics DA-100 je ruční laditelný optický attenuátor, výrobcem udávaný rozsah vlnových délek je 350 – 2050nm, kalibrován je pro pásmo 1310 – 1550nm [16]. Mezi jeho výhody patří nízký vložný útlum, vysoká přesnost a vysoký rozsah tlumených vlnových délek. Díky jeho konstrukci a možnosti bateriového napájení se jedná o zařízení vhodné pro práci v terénu. Například pro simulaci optických ztrát, určování systémové rezervy a chybovosti telekomunikačních přenosových systémů.

Měření proběhlo pro vlnové délky  $\lambda = 1250 - 1400\text{nm}$  a  $\lambda = 1518 - 1575\text{nm}$ . Nastaveny byly hodnoty útlumu 0dB, 3dB, 9dB, 15dB, 21dB, a 30dB. Výsledky jsou vztaženy k referenčnímu měření spektra optického zdroje, viz. kapitola 2.1.

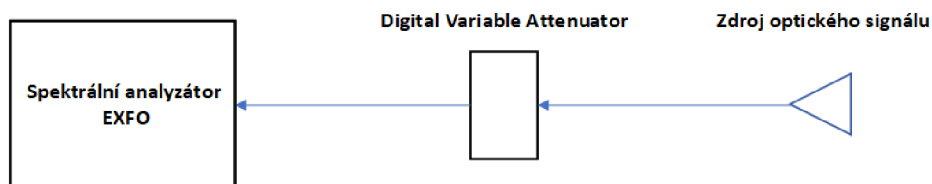
$$\text{Útlum} = P_{ref} - P_{att} \quad [\text{dB}] \quad (2.2)$$

kde:

$P_{ref}$	Naměřený referenční výkon optického zdroje bez útlumu
$P_{att}$	Naměřený výkon se zapojeným útlumovým článkem



Obr. 2.5: Digital Variable Attenuator od firmy OZ Optics



Obr. 2.6: Zapojení měřících přístrojů

Graf spektra pro vlnové délky 1250 - 1400nm přiložen v příloze A.5. U vyšších vlnových délek můžeme pozorovat vliv na šířku spektra referenčního signálu. Navíc útlum není konstantní pro všechny vlnové délky, s vyšší hodnotou  $\lambda$  útlum optického signálu klesá.

Graf spektra pro vlnové délky 1518 - 1575nm přiložen v příloze A.6. Vliv na šířku spektra ani nerovnoměrnost útlumu nejsou u vlnových délek 1518 - 1575nm natolik patrné jako pro 1250 - 1400 nm.

## 2.4 Měření spektrální závislosti laditelného útlumového článku MEMS

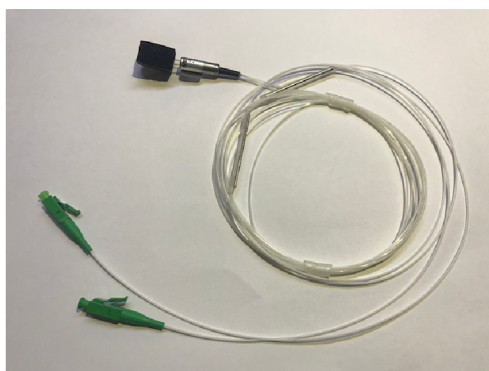
Pro měření byl použit generický MEMS útlumový článek. Katalogový list A.9. Jedná se o typický modul s kovovým pouzdem, řízený změnou napětí. Ta byla realizována laboratorním zdrojem Diametral P130R51D. Dle katalogového listu vykazuje tento článek odezvu kolem 2 ms a vložnou ztrátu do 0,70 dB a rozsah útlumu 0-40 dB při napětí 5,50 V.

Měření proběhlo pro vlnové délky  $\lambda = 1250 - 1400\text{nm}$  a  $\lambda = 1518 - 1575\text{nm}$  pro napěťové úrovně 0 V, 1 V, 2 V, 2,5 V, 3 V, 3,5 V, 4 V, 4,5 V a 5 V. Výsledky jsou vztahy k referenčnímu měření spektra optického zdroje, viz. 2.1.

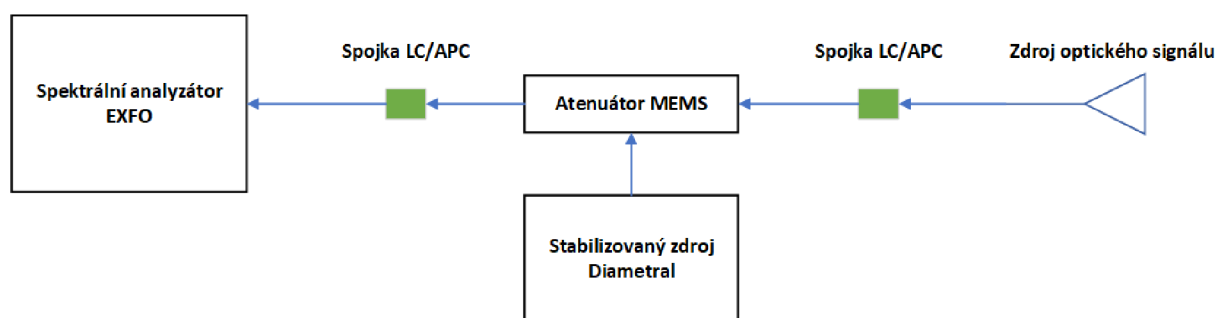
$$\text{Utlum} = P_{ref} - P_{att} \quad [\text{dB}] \quad (2.3)$$

kde:

$P_{ref}$  Naměřený referenční výkon optického zdroje bez útlumu  
 $P_{att}$  Naměřený výkon se zapojeným útlumovým článkem



Obr. 2.7: Laditelný útlumový článek MEMS



Obr. 2.8: Zapojení měřících přístrojů

Graf přiložen v příloze A.7. Zkreslení spektra je pro vyšší hodnoty útlumu velice patrné. Použitý útlumový článek je výrobcem testován pouze pro 1550 nm, proto je možné, že jde o vlastnost tohoto modelu. Útlum není ani u tohoto atenuátoru konstantní pro všechny vlnové délky, a se zvyšující se hodnotou  $\lambda$  útlum klesá. Graf přiložen v příloze A.8. Zkreslení spektra je pro vlnové délky 1518 - 1575 nm minimální, bohužel se zde projevuje nestabilita hodnoty útlumu pro celé spektrum vlnových délek. Se zvyšující se hodnotou  $\lambda$  útlum klesá.

## 3 NÁVRH MODULU

### 3.1 Vyhodnocení měření a definice požadavků

Pro návrh výsledného zařízení je zapotřebí nejprve definovat požadavky na modul:

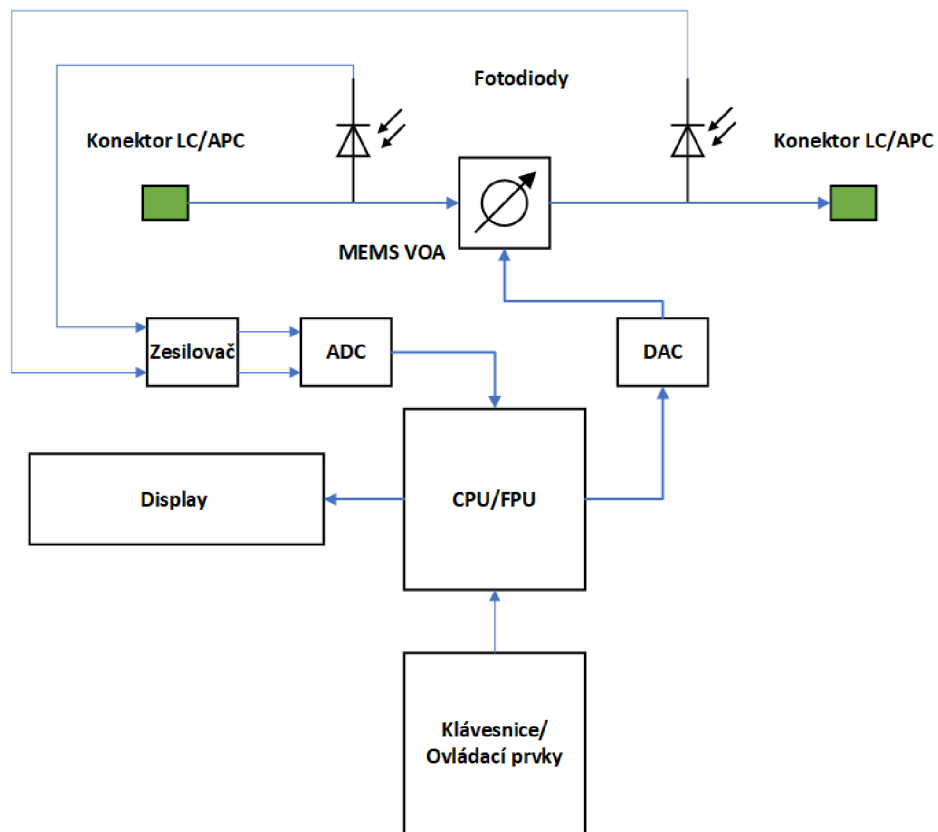
1. Možnost volby režimu fixně nastaveného útlumu a režimu zafixování výstupního výkonu pro kompenzaci nestabilního vstupního signálu.
2. Pracovní vlnové délky 1530 – 1625nm
3. Výsledné zařízení by mělo být přenosné, s vlastním displayem a ovládacími prvky umožňující nasazení v terénu.
4. Napájení z vlastního zdroje s případnou možností napájení z baterií.
5. Co nejnižší cena výsledného zařízení .

Z provedeného měření a analýzy možností byl jako nejvhodnější zvolen útlumový článek MEMS. Důvody jsou následující:

- vysoká přesnost ( $\leq 0,05\text{dB}$ )
- nízký vložený útlum ( $0,6\text{dB}$ )
- vysoká rychlost odezvy  $\sim 2\text{ms}$
- dobrá spektrální stabilita, viz. kapitola 2.4
- malé rozměry
- nízká cena (40 USD)

Na blokovém schématu 3.1 je naznačeno předpokládané zapojení výsledného samostatného modulu. Konfigurace dvou fotodiód na vstupu a výstupu byla použita jako modifikace měření útlumu metodou dvou délek (Cut Back). Je navíc vhodná pro stabilizaci konstantního útlumu v případě kolísajícího vstupního optického výkonu, což by při použití jedné fotodiody nebylo možné. Kompenzuje se tím také případná teplotní závislost použitého atenuátoru.





Obr. 3.1: Blokové schéma modulu útlumového článku

## 3.2 Výběr součástek

Výběr součástek se odvíjí od vybraného útlumového článku. Pro jeho řízení je třeba dostatečně přesný a rychlý digitálně analogový převodník - Digital-to-Analog Converter (DAC) s rozsahem napětí 0 – 5V. Dále je zapotřebí dvou fotodiod s rozsahem vlnových délek 1530 – 1625nm, k nim potom dostatečně přesný analogově digitální převodník - Analog-to-Digital Converter (ADC). Celé zařízení musí být řízeno dostatečně výkonným mikroprocesorem, zvládajícím výpočet logaritmu o základu 10 během obsluhy přerušení.

### 3.2.1 TAP diody

Pro měření úrovně vstupního a výstupního signálu byly vybrány TAP diody Go!Foton TPCL0105F11077 [18] s 0,5% poměrem vstupní ku měřené úrovni a kompaktním pouzdrem.

Parametr	Hodnota
Rozsah pracovní teploty	-40 až +85°C
Maximální předpětí	25V
Rozsah vlnových délek	1510 – 1610nm
TAP Poměr	0,5%
Vložný útlum	< 0,5dB
Maximální vstupní výkon	26dB
Linearita	±5%

Tab. 3.1: Hlavní parametry TAP diody Go!Foton

### 3.2.2 A/D převodník - MCP3903

Pro zpracování analogového signálu z TAP diod byl vybrán ADC MCP3903-E/SS firmy Microchip [19]. Jedná se o šestikanálový Delta Sigma A/D převodník umožňující dosáhnout velmi vysoké linearity převodu při vysokém rozlišení, až 24 bitů.

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozsah pracovní teploty	-40 až +125°C
Počet kanálů	6 synchronních 16/24bit
Přeslech mezi kanály	-115dB
Rozhraní	10 MHz SPI
Vzorkovací frekvence	1 – 4MHz
Pracovní napětí	4,5 – 5,5V
Chyba měření	0,1%

Tab. 3.2: Hlavní parametry převodníku MCP3903

### 3.2.3 D/A převodník - MAX5217

Pro řízení napětí na útlumovém článku MEMS byl zvolen DAC převodník MAX5217GUA+ firmy Maxim Integrated [20]. Jedná se o jednocanálový 16-ti bitový Rail-to-Rail D/A převodník.

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozsah pracovní teploty	-40 až +105°C
Počet kanálů	1 kanál 16bit
Odezva	18μs
Rozhraní	100 kHz I <sup>2</sup> C
Výstupní proud	±50μA
Pracovní napětí	2,7 – 5,5V
Rozsah výstupního napětí	0–vstupní napětí

Tab. 3.3: Hlavní parametry převodníku MAX5217

### 3.2.4 Mikroprocesor ATSAM3X8E

Pro zpracování vstupních dat z A/D převodníku, řízení D/A převodníku a obsluhu vstupně/výstupních uživatelských periférií byl vybrán mikroprocesor Atmel/Microchip ATSAM3X8E [17]. Jedná se o mikroprocesor založený na 32-bit jádru ARM Cortex-M3 rev. 2.0 s pracovním kmitočtem 84 MHz. Pro konstrukci prototypu byla zvolena vývojová platforma Arduino Due obsahující tento mikroprocesor.

Parametr	Hodnota
Rozsah pracovní teploty	-40 až +85°C
Mikroprocesor	ATSAM3X8E
Pracovní kmitočet	84MHz
Digitální rozhraní	54 kanálů
Analogová rozhraní	12 kanálů
SPI/I <sup>2</sup> C	4/2 kanály
Pracovní napětí	6 – 16V

Tab. 3.4: Hlavní parametry vývojové platformy Arduino Due

### 3.2.5 Vstupně/výstupní rozhraní

Pro zobrazení výstupních dat byl zvolen grafický LCD display Eclipsera Nokia 5110 o velikosti 1,6 palce a rozlišením 84×48 pixelů. LCD display obsahuje řídicí obvod Philips PCD8544 zprostředkovávající rozhraní SPI. Jeho provozní napětí je 2,7–3,3 V a typický proud < 200μA. Napájení LCD modulu je řešeno z 3,3 V větve vývojové desky, která poskytuje až 800 mA. Uživatelské rozhraní pro ovládání a nastavení zařízení je tvořeno třemi tlačítky. Funkce tlačítek je popsána v kapitole 3.7, která je věnována popisu ovládání zařízení.

### 3.3 Návrh digitální části obvodu

V digitální části obvodu je realizováno datové propojení A/D převodníku, D/A převodníku a vstupně/výstupní rozhraní k mikroprocesoru ATSAM3X8E. Tento návrh se drží standardizovaných způsobů propojení jednotlivých obvodů a doporučených zapojení, které jsou uvedeny v katalogových listech jednotlivých součástek.

#### 3.3.1 D/A převodník

D/A převodník MAX5217 používá ke komunikaci s mikroprocesorem sběrnici I<sup>2</sup>C. Ta je tvořena dvěma vodiči, jeden nesoucí hodinový signál (SCL), a druhý datový (SDA). Z elektrického hlediska jsou oba kanály zapojeny jako otevřený kolektor. Každý vodič musí být připojen jedním pull-up rezistorem ke kladnému napětí, což zajišťuje vysokou úroveň v klidovém stavu. Na straně převodníku jsou k vodičům připojeny ochranné Zenerovy diody. Propojení s mikrokontrolérem je realizováno přes piny D20 (SDA) a D21 (SCL), na nichž jsou u vývojové desky Arduino Due vyvedeny piny hardwarového I<sup>2</sup>C [22].

#### 3.3.2 A/D převodník

A/D převodník MCP3903 používá ke komunikaci s mikroprocesorem sběrnici SPI. Ta je tvořena čtveřicí vodičů. Hodinový signál je nesen vodičem SCK, data jsou přenášena na dvojici vodičů MISO (Master In, Slave Out) a MOSI (Master Out, Slave In). Jde tedy narozdíl od I<sup>2</sup>C o plně duplexní přenos. Posledním přenášeným signálem je SSEL (Slave Select), který slouží k výběru některého uzlu pracujícího v režimu slave. V tomto případě jsou na sběrnici pouze 2 zařízení - master a slave. Propojení s mikrokontrolérem je realizováno pomocí pinů D74 (MISO), D75 (MOSI), D76 (SCK) a D52 (SSEL). Na těchto pinech je vyvedena hardwarová sběrnice SPI [22]. Převodník navíc poskytuje signálové piny DRA, DRB a DRC, jejichž nízká úroveň signalizuje připravená data k vyčtení na odpovídajícím kanálu. V tomto obvodu využíváme pouze kanály CH0 a CH1, signalizované pinem DRA. Tento pin je připojen na pin D53 mikrokontroléru, a využit jako signál přerušení mikrokontroléru.

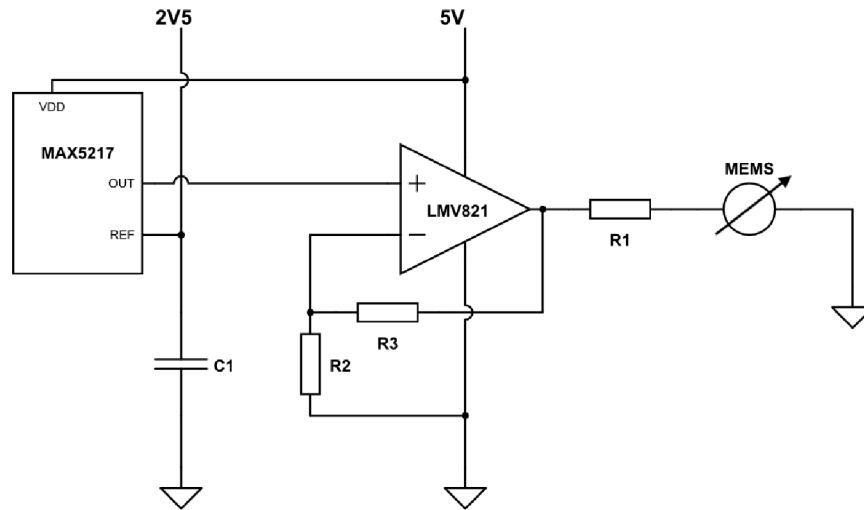
#### 3.3.3 Display a tlačítka

Display komunikuje s mikrokontrolérem stejně jako A/D převodník pomocí sběrnice SPI. Jelikož jsem nechtěl ovlivňovat přenos dat z převodníku výstupem dat na display, který není kritický pro korektní funkci celého zařízení, je zapojení displaye řešeno pomocí digitálních pinů mikrokontroléru, a jeho implementace řešena softwarově. Propojení pinů s mikrokontrolérem je následující: RST - pin D9, CE (SSEL) -

pin D10, DC (MISO) - pin D11, DIN (MOSI) - pin D12 a CLK (SCK) - pin D13. Trojice tlačítek uživatelského vstupu je připojena na piny D5, D6 a D7. Pull-up je řešen interními rezistory (režim INPUT\_PULLUP). Druhý pi tlačítek je pevně spojen se zemí. Nízká úroveň signálu na pinu tlačítka je využita jako signál přerušení mikrokontroléru.

## 3.4 Návrh analogové části obvodu

### 3.4.1 Řízení útlumového článku MEMS

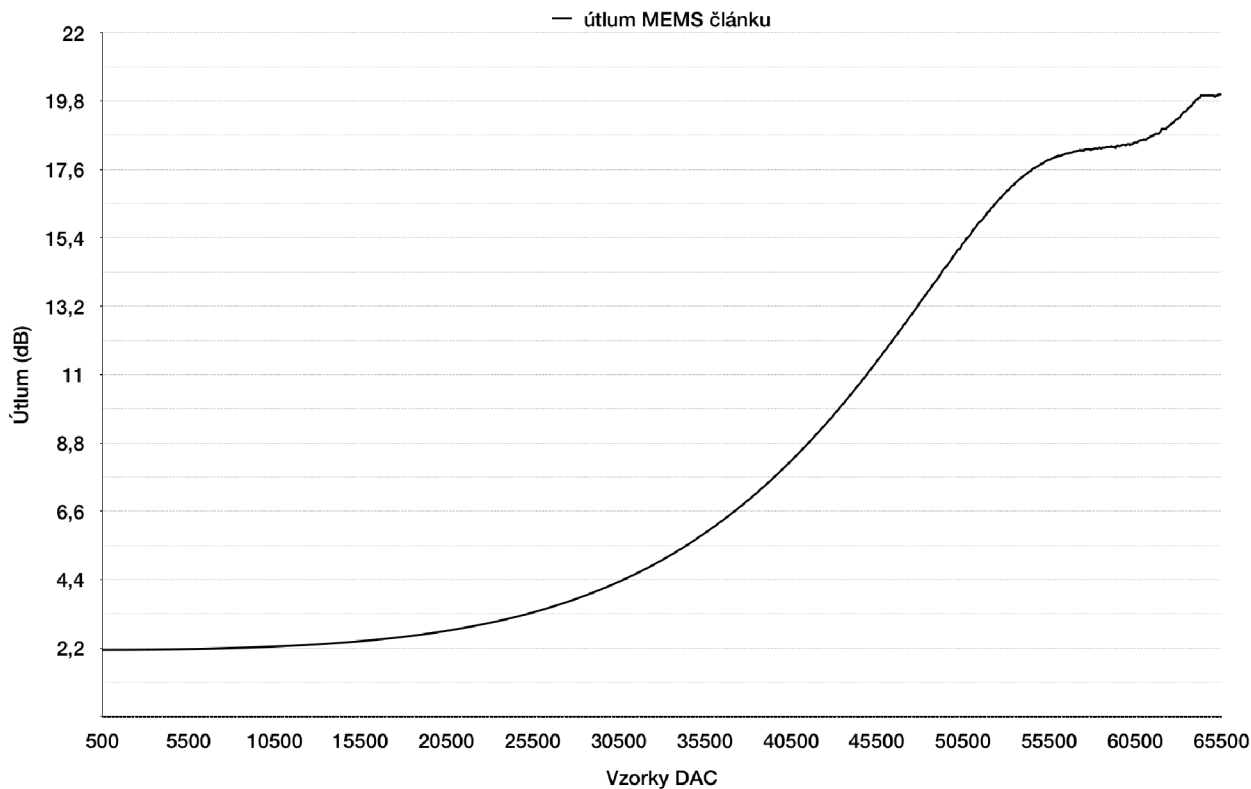


Obr. 3.2: Zjednodušené schéma zapojení řízení útlumového článku

Na výstupu D/A převodníku je připojen operační zesilovač Texas Instruments LMV821 v režimu řízení kapacitní zátěže. Návrh zapojení je převzat z katalogového listu výrobce operačního zesilovače [23]. Kompletní zapojení obvodu se nachází na straně 6 přílohy A.12. Napětí 2,5 V je řízeno napětovou referencí MAX6071AAUT25+T, viz. strana 7 přílohy A.12. Zesílení operačního zesilovače  $A$  je dáno vztahem 3.1.

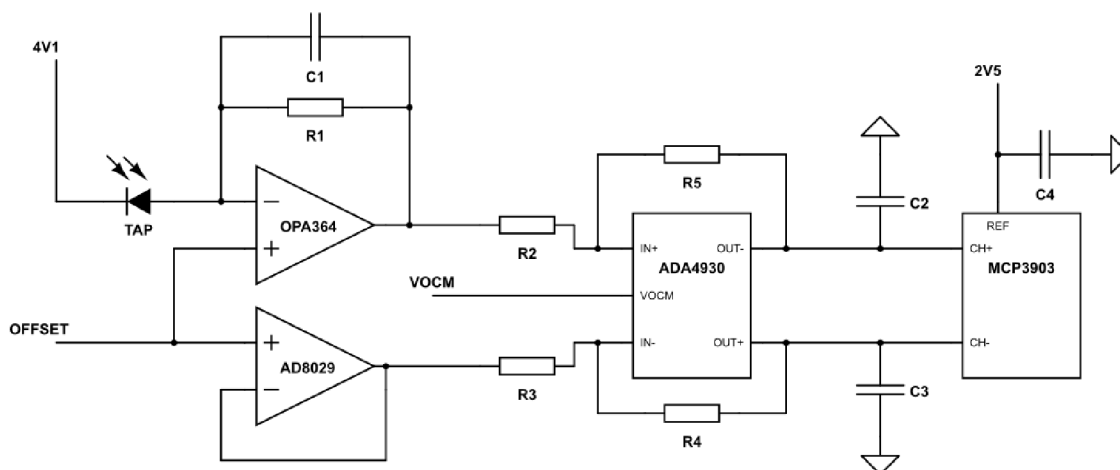
$$A = \frac{R_3}{R_2} + 1 \quad (3.1)$$

Výstup D/A převodníku je řízen napětovou referencí 2,5 V, pro plný rozsah napětí na útlumovém článku 0 – 5V tedy potřebujeme zesílení  $A = 2$ . Zvoleny byly odpory  $R_2, R_3 = 22 \text{ k}\Omega$ . Výsledný útlum MEMS článku v závislosti na vzorcích D/A převodníku je vyneseno v grafu na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Útlum MEMS článku v závislosti na nastavení D/A převodníku

### 3.4.2 Zesilovač fotodiody



Obr. 3.4: Zjednodušené schéma zapojení zesilovače fotodiody

První stupeň zesilovače fotodiody je řešen dvojicí operačních zesilovačů, OPA364AIDBUT4-ND, který zesiluje samotnou fotodiodu a AD8029AKSZ, který je ve funkci bufferu.



OFFSET je dodáván z napěťové reference MAX6071AAUT41+T přes napěťový dělič. Jeho hodnota je 0,6 V. Stejně napětí je zároveň dodáváno jako předpětí diody v závěrném směru. Zesílení prvního stupně je dáno rezistorem  $R_1$ . Použitá TAP dioda Go!Foton má uvedenou responsivitu  $4 - 8,5 \text{ mA W}^{-1}$ , její výstup je zesílen pro dosažení rozsahu vstupu A/D převodníku. Zesílení získáme ze vztahu 3.2.

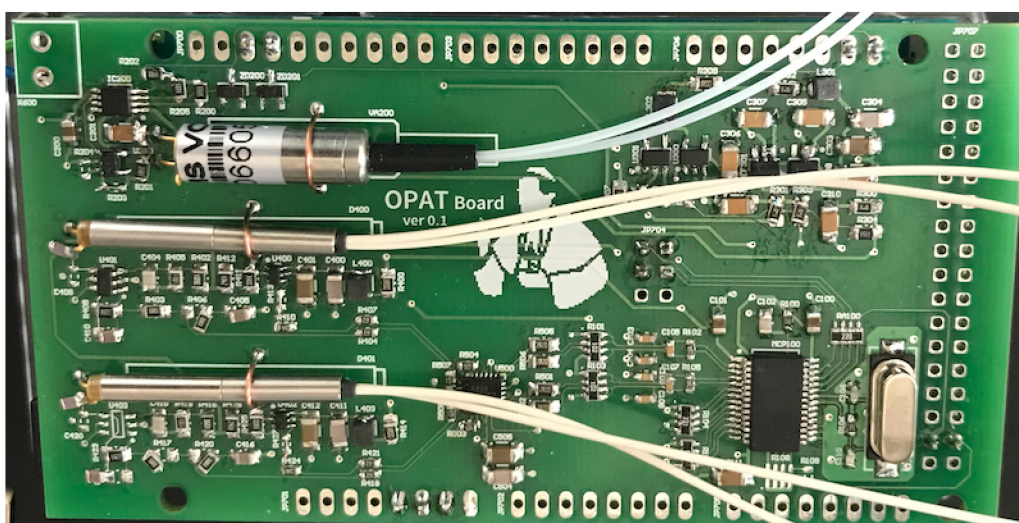
$$U_{OUT} = I_D \cdot R_{FB} \quad (3.2)$$

Diferenciální linkový budič ADA4930 na druhém stupni zesilovače podporuje na svém vstupu rozsah 0,3 – 2,8V. Adekvátní zesílení bylo zvoleno  $PD_{GAIN} = 30000$ , hodnota rezistoru  $R_1$  je tedy dle vztahu 3.1 30 k $\Omega$ . Vyšší zesílení nebylo zvoleno pro udržení hladiny šumu. Na vstupu diferenciálního zesilovače ADA4930 tedy při maximální udávané responsivitě TAP diody dostáváme rozsah 0,384 – 1,118V. Napětí VOVM je dodáváno napěťovým děličem z referenčního napětí 2,5 V a bufferováno operačním zesilovačem OPA364AIDBVTG4-ND. Jeho hodnota je 0,9 V. Diferenciální zesilovač pracuje se zesílením  $A = 1$  a signál z něj je přiveden na napěťový dělič, kterým je upraven rozsah na  $\pm 0,175\text{V}$ , tím získáváme potřebný rozsah pro diferenční vstup A/D převodníku MCP3903 [19]. Plný rozsah A/D převodníku bude dosažen při nastaveném vnitřním zesílení 4. Kompletní zapojení obvodu se nachází na stranách 2, 3, 4 a 5 přílohy A.12.

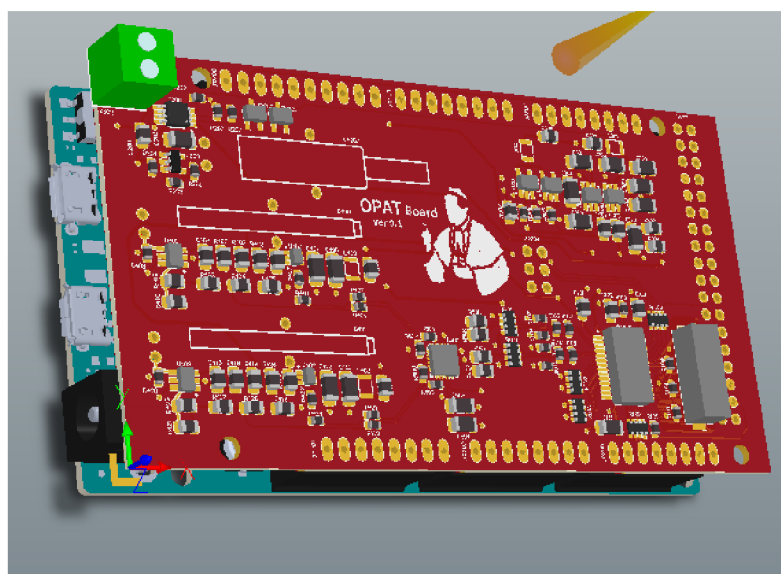
### 3.5 Deska plošných spojů (DPS)

Po návrhu kompletního elektrického schématu byl vytvořen návrh desky plošných spojů. Modul byl navržen jako shield pro vývojovou desku Arduino DUE, proto byly dodrženy maximální rozměry 101,6 mm (4 couly) na 53,34 mm (2 couly). Osazení desky je oboustranné, převážně součástkami o rozměrech 0805 a 1206. Na hustěji osazených místech desky byly použity součástky o rozměrech 0603. V příloze A.13 se nachází výkresy horní a spodní strany desky plošných spojů. Výroba finální verze desky včetně vrtání a prokovů byla zadána firmě APAMA.

Osazení desky SMD součástkami proběhlo kompletně ručně za použití pájecí stanice.



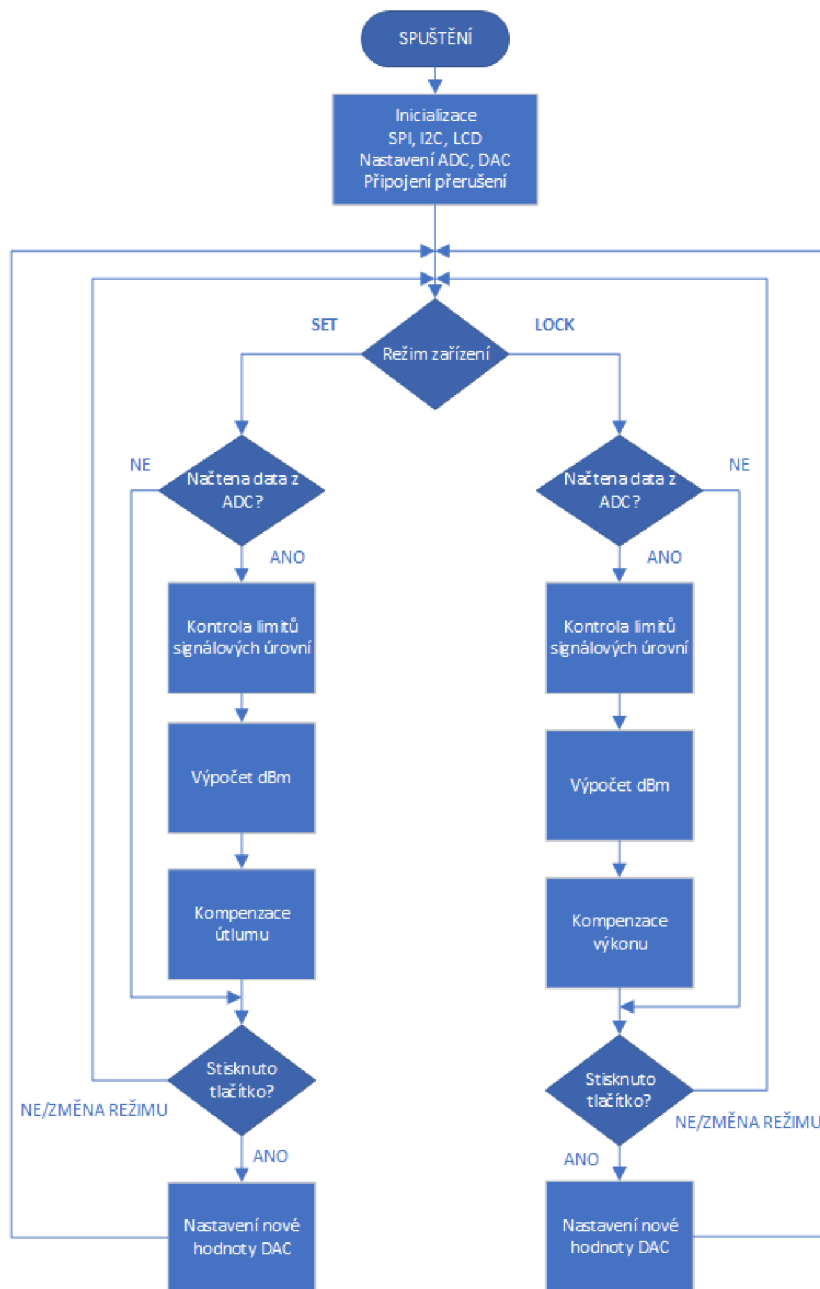
Obr. 3.5: Osazená deska plošných spojů



Obr. 3.6: 3D model modulu připevněného na vývojovou desku Arduino DUE

### 3.6 Program mikrokontroléru

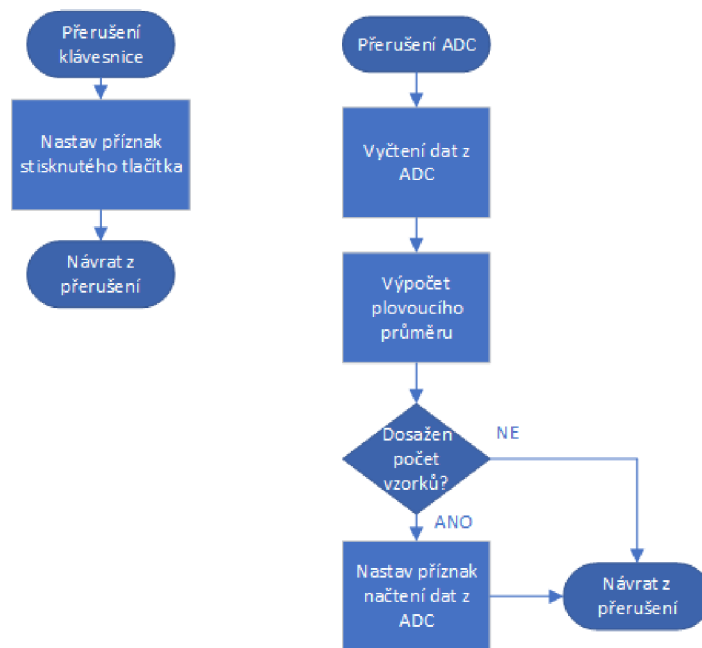
Tato kapitola je věnována popisu programu mikrokontroléru ATSAM3X8E. Vývojový diagram programu je znázorněn na obrázku 3.7. Po spuštění zařízení (připojením k napájení) jsou nastaveny potřebné registry a porty samotného procesoru. Poté jsou nastaveny parametry D/A a A/D převodníků MCP3903 a MAX5217. Po fázi inicializace přechází procesor do smyčky, v níž je vykonáván hlavní proces. V hlavním procesu je testován stav několika globálních proměnných, které mohou být nastaveny pomocí obsluhy přerušení.



Obr. 3.7: Vývojový diagram programu mikrokontroléru

Při obsluze přerušení vyvolaného tlačítkem dojde pouze k nastavení globální proměnné, které tlačítko bylo stisknuto. V hlavním programu pak dojde k vykonání příslušné funkce, a to buď změně provozního režimu, nebo inkrementaci/dekrementaci nastavené hodnoty a adekvátní nastavení D/A převodníku.

Obsluha přerušení A/D převodníku nejprve vyčte aktuální hodnotu obou kanálů a poté vypočítá jejich plovoucí průměr nad nastaveným počtem vzorků. Pokud je dosažen konkrétní počet vzorků, je rovněž nastavena globální proměnná. Na základě této proměnné je pak v hlavním programu vyvolán přepočítání kompenzace útlumu nebo výstupního výkonu, v závislosti na nastaveném provozním režimu.



Obr. 3.8: Vývojový diagram obsluhy přerušení

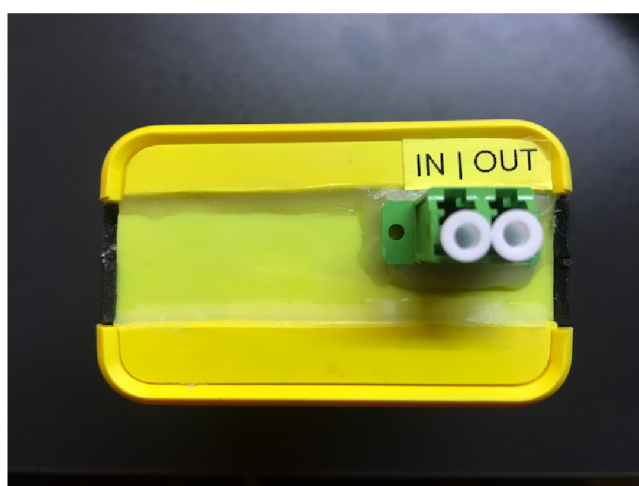
## 3.7 Popis zhotoveného zařízení

### 3.7.1 Pouzdro

Modul včetně vývojové desky a interních optických propojů byl umístěn do modifikovaného přístrojového pouzdra 1553BYLBK firmy Hammond Electronics. Velikost výsledného zařízení nepřesahuje 13,3×7,8×4,4 cm (výška×šířka×hloubka), což ho činí plně přenositelným.



Obr. 3.9: Čelní strana zařízení s displayem a ovládacími prvky



Obr. 3.10: Horní strana zařízení s optickým konektorem LC/APC

### 3.7.2 Parametry a funkce zařízení

Přístroj je napájen 5 V 1000 mA zdrojem usměrněného napětí (DC), který je v případě potřeby možno nahradit akumulátorovou bankou se stejným napětím.

Periferie tvoří grafický display s rozlišením 84×48 bodů, tři ovládací tlačítka, vstupní a výstupní optický konektor typu LC/APC, konektor pro připojení napájecího napětí a 2 konektory typu microUSB.

Zařízení pracuje ve dvou základních režimech:

1. nastavení fixního útlumu mezi vstupem a výstupem (SET)
2. zafixování určitého výstupního výkonu (LOCK)

Režim zařízení se nastavuje stisknutím tlačítka MODE.

V režimu fixního útlumu ovládají tlačítka se šipkami požadovanou úroveň útlumu, a to v rozsahu 2,50 dB až 20 dB po krocích 0,50 dB. V režimu zafixování výstupního výkonu ovládají tlačítka se šipkami požadovanou úroveň výstupního výkonu, a to v rozsahu -8 dBm až -30 dBm po krocích 0,50 dBm. Grafický display je v obou režimech rozdělen na tři řádky po 8 bodech a jeden řádek 16-ti bodový.

Na display jsou zobrazovány následující hodnoty:

- CH0 s výkonovou úrovní vstupního optického signálu v dBm, nebo varování o překročení rozsahu přístroje (CH0 LOW / CH0 HIGH)
- CH1 s výkonovou úrovní výstupního optického signálu v dBm, nebo varování o překročení rozsahu přístroje (CH1 LOW / CH1 HIGH)
- DIFF s aktuálním měřeným rozdílem úrovní vstupního a výstupního optického signálu v dB nebo varování o příliš nízké hodnotě vstupního signálu pro nastavenou hodnotu požadovaného výstupního signálu v režimu LOCK
- ATT v režimu SET udává hodnotu nastaveného fixního útlumu v dB, TARGET v režimu LOCK udává hodnotu požadovaného výstupního výkonu v dBm



(a) Nastavený útlum 2,50 dB



(b) Varování překročené úrovně signálu

Obr. 3.11: Display přístroje v režimu SET





(a) Nastavený výstupní výkon -12,00 dBm (b) Varování nedostatečné úrovně signálu

Obr. 3.12: Display přístroje v režimu LOCK

Parametry přístroje jsou uvedeny v následující tabulce 3.5.

Parametr	Hodnota
Maximální rozsah nastaveného útlumu	2,50 dB až 20 dB
Maximální rozsah nastaveného výstupního výkonu	-8 dBm až -30 dBm
Vložný útlum	2,50 dB
Rozsah vlnových délek	1510 - 1610 nm
Maximální úroveň vstupního optického signálu	-5 dBm
Minimální úroveň vstupního optického signálu	-30 dBm
Napájecí napětí	5 V DC

Tab. 3.5: Hlavní parametry sestrojeného zařízení

### 3.8 Kalkulace ceny

Tato kapitola se věnuje kalkulaci výsledné ceny vyrobeného zařízení a cenové srovnání s podobnými produkty. Počty součástek a jejich orientační ceny jsou uvedeny v tabulce 3.6.

Součástka	počet kusů	Orientační cena v USD
MEMS útlumový článek	1	40\$
TAP dioda TPCL0105F11077	2	20\$
Arduino Due	1	37,40\$
ADA4930	1	16\$
MCP3903-E/SS	1	4,50\$
MAX5217GUA+	1	4,40\$
MAX6071AAUT25+T	1	3,20\$
MAX6071AAUT41+T	1	3,30\$
OPA364AIDBVTG4-ND	4	1,30\$
AD8029AKSZ	2	2\$
LMV821	1	1,30\$
Další SMD součástky	-	15\$
Výroba PCB	1	12\$
Přístrojové pouzdro Hammond	1	8,20\$
Grafický display	1	6,40\$
Součet	-	200,9\$, v přepočtu 4400 Kč

Tab. 3.6

Uvedené ceny jsou orientační. Jedná se o ceny při odběru 1 kusu součástky, nebo v případě výroby desky plošných spojů o výrobu vzorků.

U větší série přístrojů by cena byla podstatně nižší. Ceny komerčně prodávaných laditelných optických útlumových článků se běžně pohybují okolo 15-30 tisíc korun. Oproti tomuto řešení však využívají techniku tlumení ohybem vlákna, jako například testovaný atenuátor Digital Variable Attenuator od firmy OZ Optics. Jejich nevýhodou je řádově pomalejší rychlost přeladění, nedokáží tak nabídnout funkcionalitu zafixování určitého výstupního výkonu. Pokud bychom k ceně materiálu připočítali náklady na vývoj, výrobu a testování, výsledná cena by se pohybovala okolo 12-15 tisíc Korun Českých, což je i s přihlédnutím k některým nedostatkům tohoto zařízení konkurenceschopná cena.



## 4 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl návrh a konstrukce modulu pro řízení útlumu optického signálu určeného pro telekomunikační aplikace. Zkonstruované zařízení využívá útlumového článku typu MEMS společně s TAP diodami na vstupu a výstupu. Díky tomu je zařízení schopno nejen tlumit vstupní signál, ale navíc pracovat v režimu zafixování určitého výstupního výkonu.

Rozsah vlnových délek pro které je zařízení určeno (1510-1610nm) spadá do pásma systémů využívajících hustý vlnový multiplex. Zařízení najde využití zejména při simulaci optických ztrát, určování systémové rezervy a chybovosti telekomunikačních přenosových systémů. Díky režimu zafixování výstupního výkonu může být použito při měření spektra DWDM systému, kdy chceme dosáhnout na vstupu spektrálního analyzátoru konstantní úrovně měřeného signálu.

Díky malým rozměrům je navíc zařízení vhodné i pro práci v hůře přístupných místech a terénu.

Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. Teoretická část se zabývá teorií týkající se samotného přenosu paprsku optickým vláknem a dále specifikací jevů, které ve vlákně způsobují útlum, nebo jiné nežádoucí vlivy. Dále jsou charakterizovány existující druhy fixních a variabilních útlumových článků a objasněny jejich výhody a nevýhody.

Praktická část práce se zabývá návrhem a fyzickou konstrukcí modulu pro řízení útlumu optického signálu využívající útlumový článek MEMS. Dále je stručně popsán program mikrokontroléru a specifikovány vlastnosti a funkce zkonstruovaného zařízení a způsob jeho ovládání.

K nedostatkům zkonstruovaného zařízení patří jeho malý spektrální rozsah a vysoká úroveň šumu při vysokých úrovních nastaveného útlumu na článku MEMS způsobená nevhodně navrženou zemnicí vrstvou desky plošných spojů.

Ve vývoji tohoto zařízení hodlám dále pokračovat, a na základě testů provedených na aktuální verzi bych přistoupil k následujícím změnám:

- Zlepšení odrušení útlumového článku MEMS a TAP diod
- Integrace mikroprocesoru ATSAM3X8E na společnou desku
- Dynamické nastavení zesílení prvního stupně zesilovače TAP diod umožňující vyšší rozsah měřené úrovně vstupního a výstupního signálu

Mezi přínosy této práce patří rozbor vlastností optických vláken v oblasti jejich útlumu a přehled o technikách používaných k tlumení optických signálů. Dalším přínosem může být podrobný popis návrhu a konstrukce, který může sloužit jako vodítko pro ty, kteří nemají s návrhem elektronických zařízení žádné vlastní zku-

šenosti. Práce může sloužit i jako základ pro konstrukci sofistikovanějšího modulu pro útlum optického signálu, nebo jiného zařízení, vyžadujícího přesné řízení. Jako osobní přínos bych zařadil zkušenosti nabyté při návrhu a konstrukci tohoto zařízení.

## LITERATURA

- [1] FILKA, Miloslav: *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku.*, Brno: Miroslav Filka, druhé vydání, 2017. ISBN 978-80-86785-14-1
- [2] FILKA, Miroslav: *Optoelectronics for telecommunications and informatics.*, Dallas, Texas, USA: Optokon CO., LTD., první vydání, 2009.
- [3] DONATI, Silvano: *Photodetectors: devices, circuits, and applications.*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2000. ISBN 0-13-020337-8.
- [4] KYSELÁK, Martin: *Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy. Disertační práce*, Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, 2009. Školitel Doc. Ing. Miloslav Filka, CSc. ISBN 978-80-214-3827-9.
- [5] RAJAN, Ginu: *Optical fiber sensors: advanced techniques and applications.*, Raton: CRC Press, Taylor, 2015. ISBN 978-148-2228-250.
- [6] UDD, Eric a SPILLMAN B. William : *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed.*, Hoboken, N.J.: John Wiley, 2011. ISBN 978-047-0126-844.
- [7] BUBNÍK, Lukáš; KLAJBL, Jiří; MAZUCH, Petr: *Optoelektrotechnika.*, Code Creator, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-88058-20-5.
- [8] DADO, M.; TUREK, I.; ŠTELINA, J.; BITTERER, L.; TUREK, S.; GROMMUS, E.; STIBOR, P.: *Kapitoly z optiky pro technikov.*, Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 1998. ISBN 80-7100-390-5.
- [9] Electronics Notes: *Photodiode structures* [online]. [cit. 2017-12-2]. Electronics Notes. Dostupné z URL: <https://www.electronics-notes.com>.
- [10] Liu, Ai-Qun: *Photonic MEMS Devices: Design, Fabrication and Control.*, CRC Press, 2008. ISBN 9781420045680
- [11] Fiber Optic Network Products | FS.COM: *Advanced Optical Components – Optical Attenuator* [online]. FS.COM. [cit. 2017-11-27]. Dostupné z URL: <http://www.fiberopticshare.com>.
- [12] Fiber Instrument Sales: *FIS 3 Step attenuators* [online]. [cit. 2017-11-23]. Dostupné z URL: <http://www.fiberinstrumentsales.com>.
- [13] GHATAK Ajoy ,Thyagarajan K.: *Introduction to Fiber Optics.*, New Delhi: Cambridge University Press, 1999. ISBN 0-521-57120-0.

- [14] VOJÁČEK, Antonín: *Co se skrývá pod zkratkou MOEMS ?* [online]. HW server, 2009 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z URL: <https://vyvoj.hw.cz>.
- [15] L. A. Mochalov; A. S. LOBANOV; A. V. NEZHDANOV; M. A. KUDRYASHOV; A. I. MASHIN; A. N. STEPANOV; A. I. KORYTIN; A. V. VOROTYNTSEV; V. M. VOROTYNTSEV *Comparison of optical properties and impurities content of Ge-Sb-S-I glasses prepared by different methods*. Optical Materials EXPRESS 3759: Vol. 6, No. 12 | 1.12.2016.
- [16] *DIGITAL VARIABLE ATTENUATOR*[online]. [cit. 2018-5-19]. Dostupné z URL: <https://www.ozoptics.com>.
- [17] *Atmel SMART ARM-based MCU DATASHEET*[online]. [cit. 2018-5-19]. Dostupné z URL: <http://ww1.microchip.com>.
- [18] *TAP Detector Single Channel Datasheet*[online]. [cit. 2018-5-19]. Dostupné z URL:<http://gofoton.com/>.
- [19] *MCP3903 Six Channel Delta Sigma A/D Converter*[online]. [cit. 2018-5-19]. Dostupné z URL:<http://ww1.microchip.com>.
- [20] *MAX5215/MAX5217 14-/16-Bit, Rail-to-Rail DACs*[online]. [cit. 2018-5-19]. Dostupné z URL:<https://datasheets.maximintegrated.com>.
- [21] *LCD display Nokia 5110*[online]. [cit. 2018-5-19]. Dostupné z URL:<https://arduino-shop.cz>.
- [22] *Arduino DUE schematic*[online]. [cit. 2018-5-19]. Dostupné z URL:<https://www.arduino.cc/>.
- [23] *LMV82x Operational Amplifiers*[online]. [cit. 2018-5-19]. Dostupné z URL:<http://www.ti.com>.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

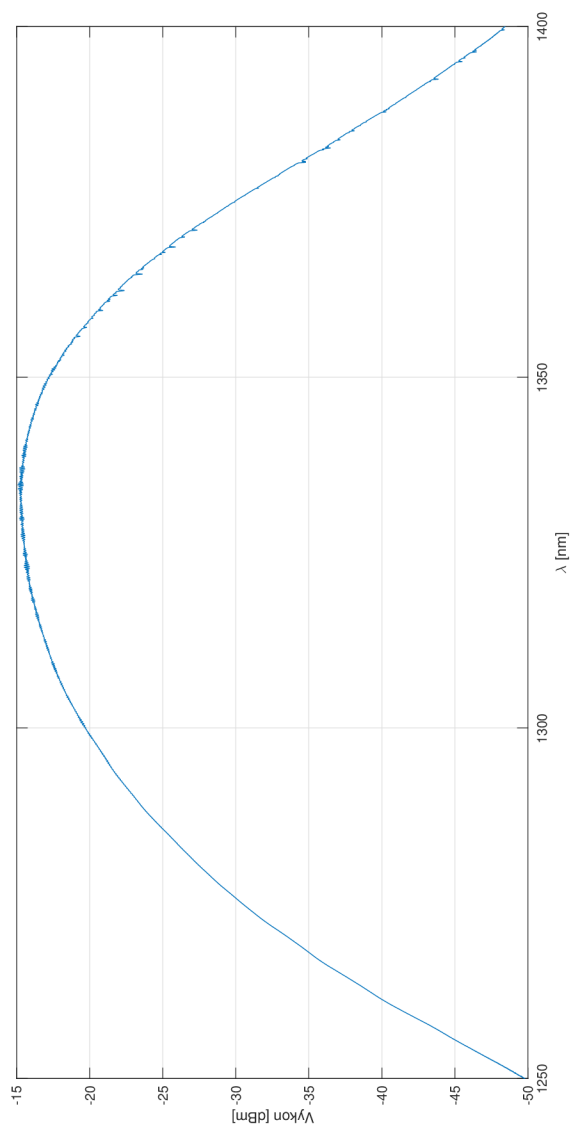
NA	Numerická Apertura
SM	jednovidová - Single Mode
MM	mnohovidová - Multimode
GI	gradientní - Gradient Index
SI	se skokovou změnou indexu lomu - Step Index
VOA	variabilní optický útlumový článek - Variable Optical Attenuator
PMD	Polarizační vidová disperze - Polarization Mode Dispersion
CD	Chromatická disperze - Chromatic Dispersion
WDM	vlnový multiplex - Wavelength-Division Multiplexing
DWDM	hustý vlnový multiplex - Dense Wavelength-Division Multiplexing
LED	Světlo vyzařující diody - Light Emitting Diode
LD	Polovodičové Laserové diody - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
DFB	Laserová dioda s distribuovanou zpětnou vazbou - Distributed FeedBack
FP	Fabry-Perot Laserová dioda
VOA	laditelné optické atenuátory - Variable Optical Attenuator
SNR	Odstup signálu od šumu - Signal to Noise Ratio
ND	Neutrální filtr - Neutral Density filter
BER	bitová chybovost - Bit Error Rate
MEMS	MikroElektroMechanické Systémy - MicroElectroMechanical Systems
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
ADC	analogově digitální převodník - Analog-to-Digital Converter
DAC	digitálně analogový převodník - Digital-to-Analog Converter

# SEZNAM PŘÍLOH

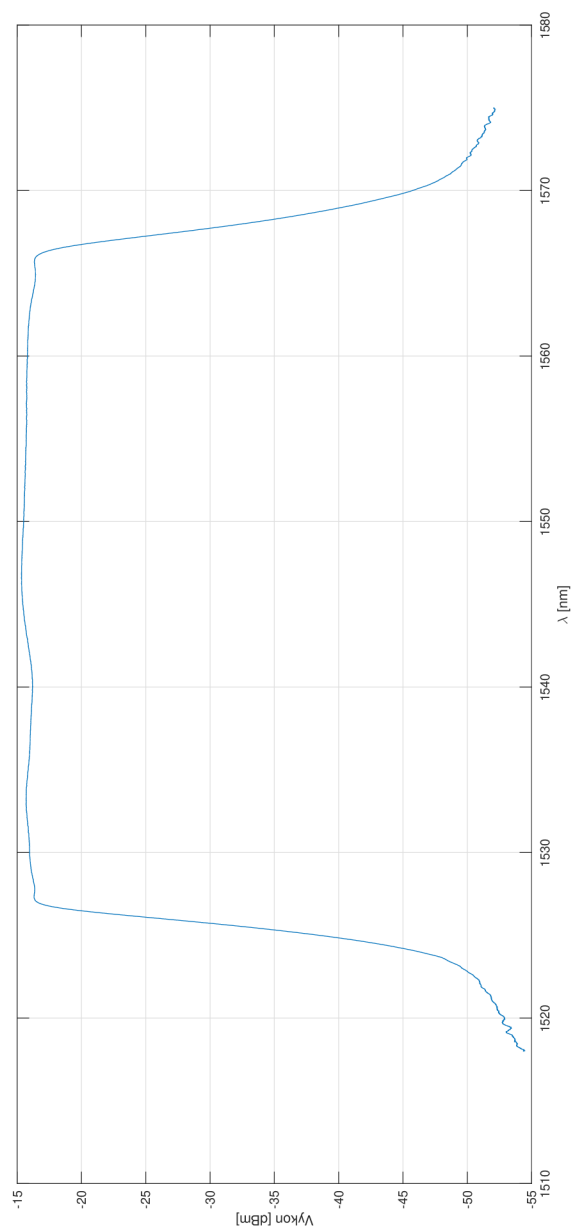
<b>A Přílohy</b>	<b>72</b>
A.1 Spektrum zdroje optického signálu pro vlnové délky 1250 - 1400 nm .	72
A.2 Spektrum zdroje optického signálu pro vlnové délky 1518 - 1575 nm .	73
A.3 Spektrální závislost pevných útlumových článků pro vlnové délky 1250 - 1400 nm . . . . .	74
A.4 Spektrální závislost pevných útlumových článků pro vlnové délky 1518 - 1575 nm . . . . .	75
A.5 Spektrální závislost útlumového článku OZ Optics pro vlnové délky 1250 - 1400 nm . . . . .	76
A.6 Spektrální závislost útlumového článku OZ Optics pro vlnové délky 1518 - 1575 nm . . . . .	77
A.7 Spektrální závislost útlumového článku MEMS pro vlnové délky 1250 - 1400 nm . . . . .	78
A.8 Spektrální závislost útlumového článku MEMS pro vlnové délky 1518 - 1575 nm . . . . .	79
A.9 Katalogový list MEMS VOA 1550 nm . . . . .	80
A.10 Katalogový list SLED DL-CS3184A . . . . .	81
A.11 Katalogový list HY-ASE-C-G-13-M-FA . . . . .	83
A.12 Schéma zapojení . . . . .	84
A.13 Deska plošných spojů . . . . .	93

# A PŘÍLOHY

## A.1 Spektrum zdroje optického signálu pro vlnové délky 1250 - 1400 nm

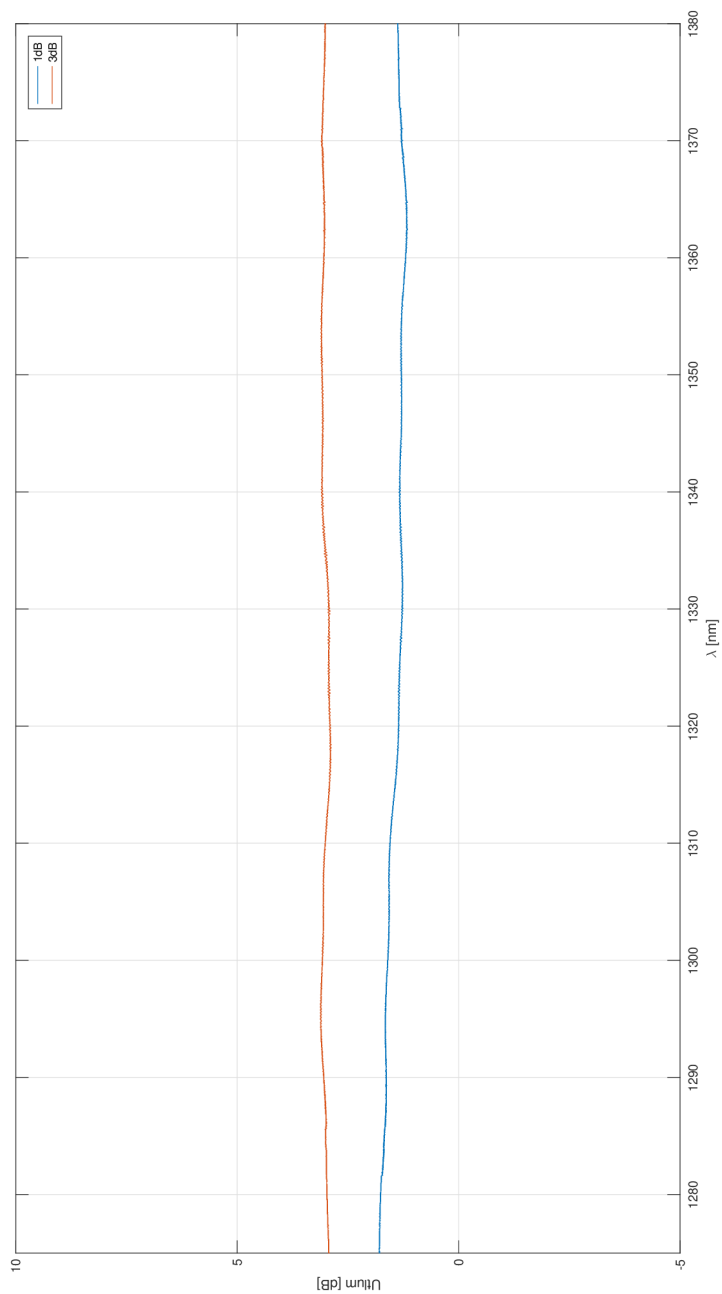


## A.2 Spektrum zdroje optického signálu pro vlnové délky 1518 - 1575 nm

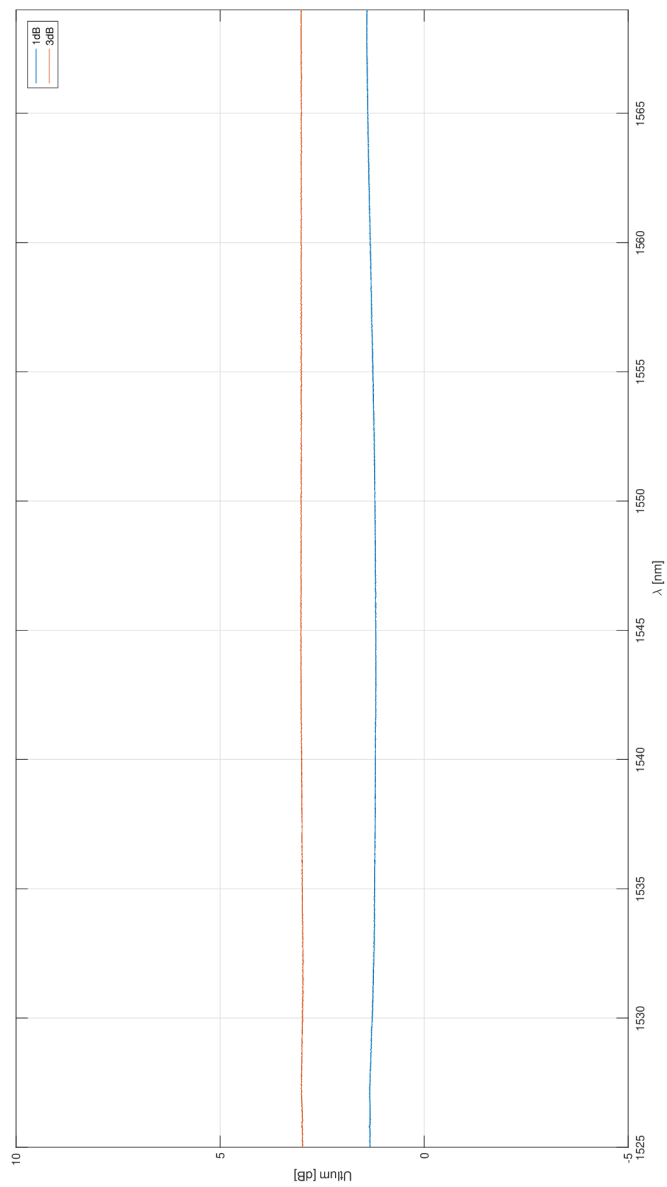




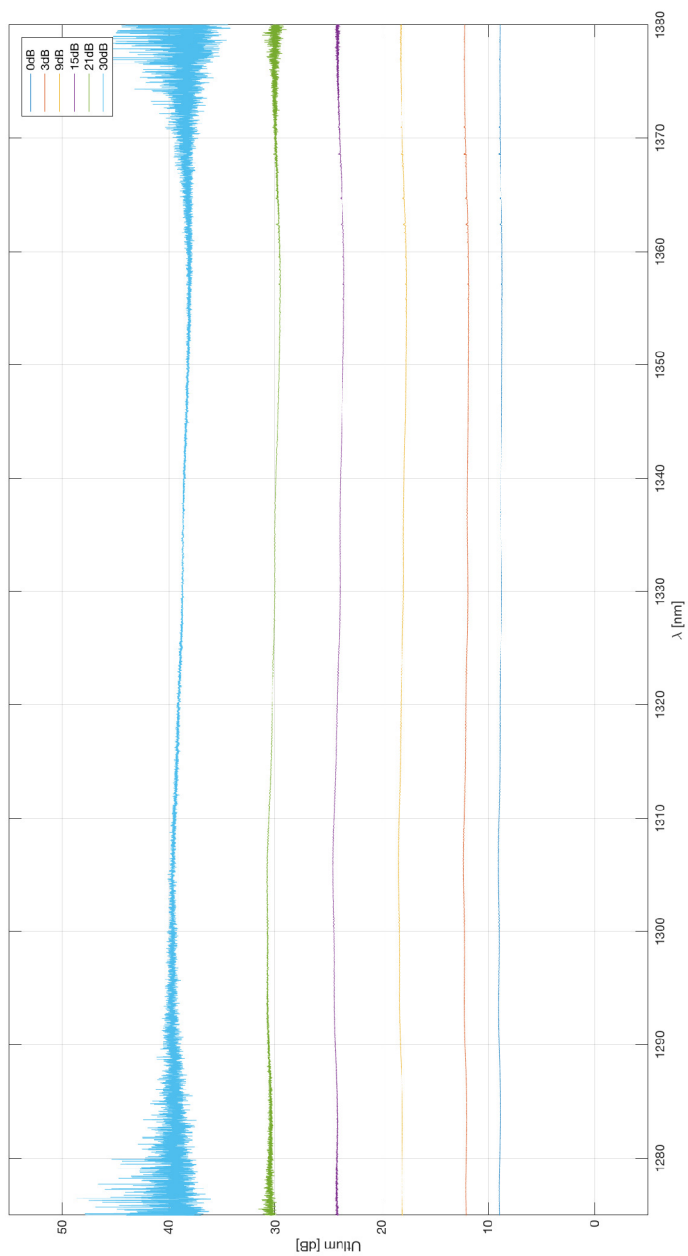
### A.3 Spektrální závislost pevných útlumových článků pro vlnové délky 1250 - 1400 nm



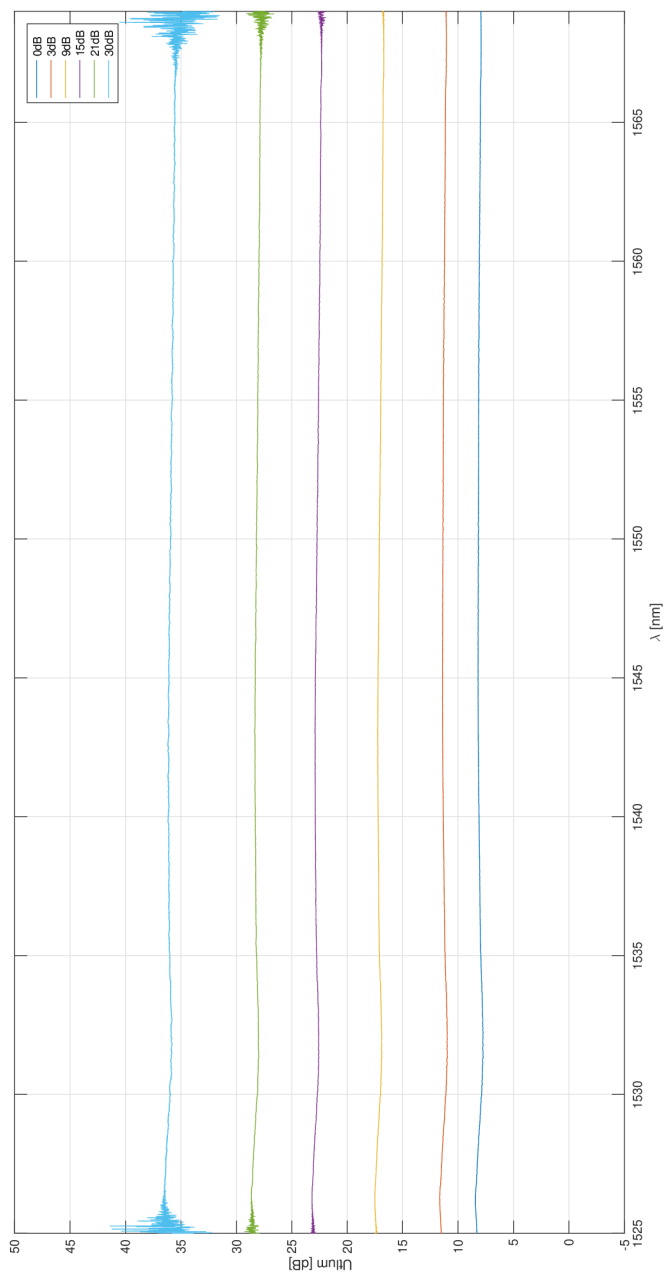
## A.4 Spektrální závislost pevných útlumových článků pro vlnové délky 1518 - 1575 nm



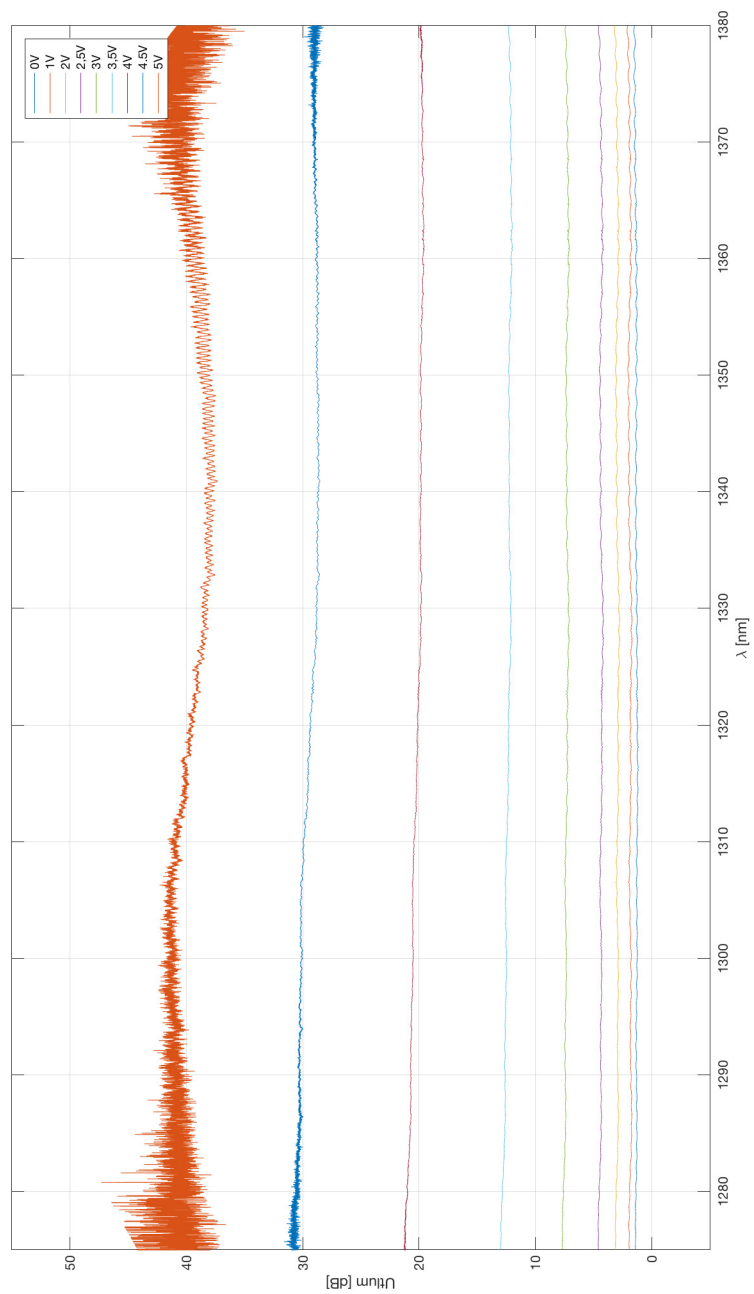
## A.5 Spektrální závislost útlumového článku OZ Optics pro vlnové délky 1250 - 1400 nm



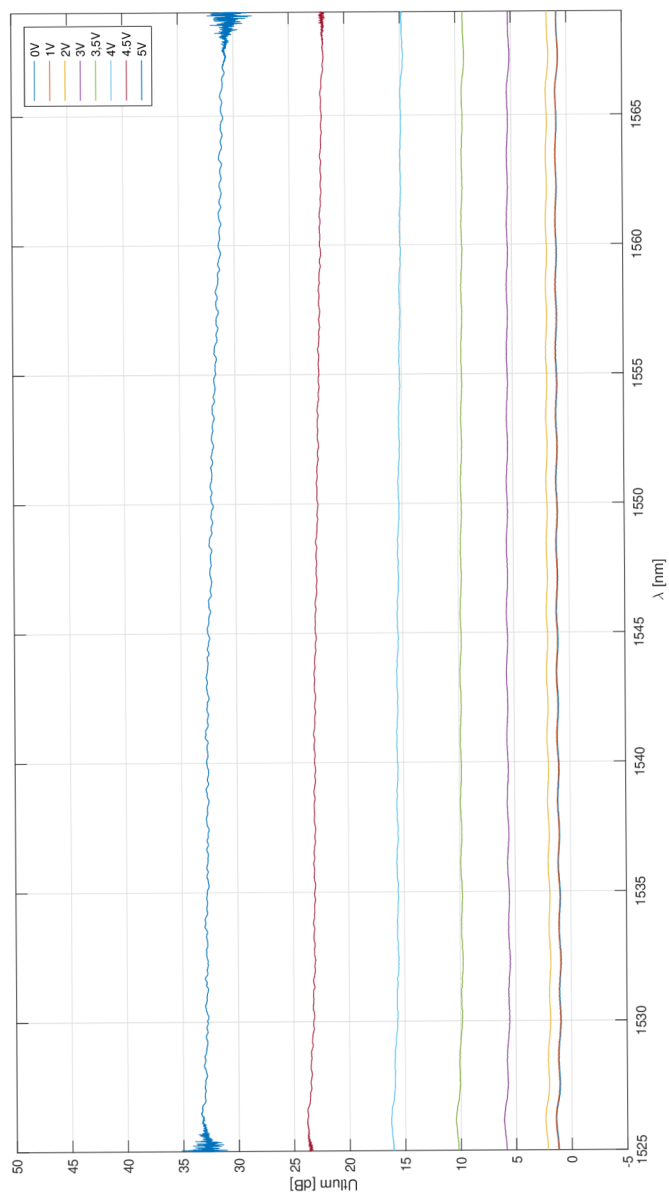
## A.6 Spektrální závislost útlumového článku OZ Optics pro vlnové délky 1518 - 1575 nm



## A.7 Spektrální závislost útlumového článku MEMS pro vlnové délky 1250 - 1400 nm



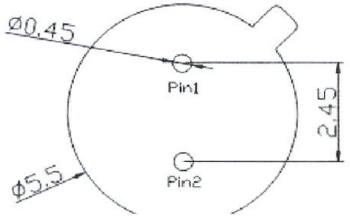
## A.8 Spektrální závislost útlumového článku MEMS pro vlnové délky 1518 - 1575 nm



# MEMS VOA TEST REPORT

DATE:2016-11-15

S/N	Wavelength Range (nm)	Attenuation Range (dB)	Insertion Loss (dB)	Return Loss (dB)	TDL (dB)		PDL (dB)	WDL (dB)	Power Consumption (ms)	precision (dB)	Optical Power Handling (mW)	Repeatability (dB)	Temperature decay stability (dB)	Driving Voltage (V)/40dB	maximum operating voltage (V)	Operating Temperature (°C)	Storage Temperature Range (°C)	Size (mm)	coupling
					0~40dB														
	1550	0~40	≥55	≤0.55	≤0.05	≤0.28	<10	≤0.05	300	±0.10	±0.3	6	-5~70	-45~85	Φ 5.5x2				
1606601	√	√	0.60	√	√	√	√	√	√	√	√	√	5.10	√	√	√	√		
1606602	√	√	0.70	√	√	√	√	√	√	√	√	√	5.30	√	√	√	√		
1606603	√	√	0.55	√	√	√	√	√	√	√	√	√	5.30	√	√	√	√		
1606604	√	√	0.50	√	√	√	√	√	√	√	√	√	5.00	√	√	√	√		
1606605	√	√	0.65	√	√	√	√	√	√	√	√	√	5.50	√	√	√	√		



pin1 +  
pin2 -

Note: please make sure that the voltage is 0 V before use, and anti-static! When power: the first negative, then on the positive, slow and electric! Under the power: preferential positive, reassume anode, electric before, please ensure voltage of 0, please use the correct, otherwise it will burn the attenuator

A.9 Katalogový list MEMS VOA 1550 nm



3. Sample Testing Record

A. Acceptance Testing Record - S/N : 1327GU1001E

Item No	Parameter	Symbol	Condition	Spec	Measurement Value	Units	Pass/Fail
1	Forward voltage	$V_F$	$I_{op}=350mA$	$\leq 2$	1.72	V	Pass
2	Output Power	$P_o$	$I_{op}=350mA$	$\geq 18$	21.8	mW	Pass
3	Center Wavelength	$\lambda$	$I_{op}=350mA$	$1310 \pm 20$	1312.9	nm	Pass
4	Bandwidth	$B_{FWHM}$	$I_{op}=350mA$	$\geq 40$	44.5	nm	Pass
5	Spectrum ripple	R	$I_{op}=350mA$	$\leq 0.35$	0.10	dB	Pass
6	Thermistor Resistance	$R_{therm}$	$T_{tec}=25^\circ C$	$10 \pm 0.5$	10	$K\Omega$	Pass
7	Thermoelectric cooler voltage	$V_{TEC}$	$I_{op}=350mA$	$\leq 2.5$	1.33	V	Pass
8	Thermoelectric cooler current	$I_{TEC}$	$I_{op}=350mA$	$\leq 1.1$	0.65	A	Pass

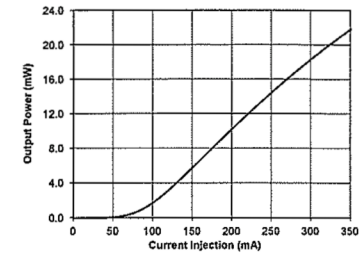
Remarks  
Item 1 to 8 is done under TEC controlled temperature of 25°C



B. Plots S/N : 1327GU1001E

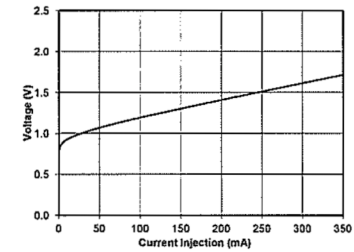
a) Power vs Operating current

Testing condition  
 $T_{ambient} : 25^\circ C$   
 $T_{TEC} : 25^\circ C$



b) Forward Voltage vs Operating Current

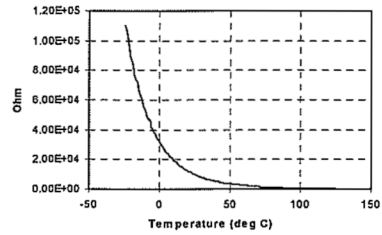
Testing condition  
 $T_{ambient} : 25^\circ C$   
 $T_{TEC} : 25^\circ C$





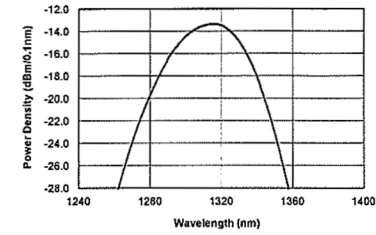


c) Thermistor Resistance vs Temperature



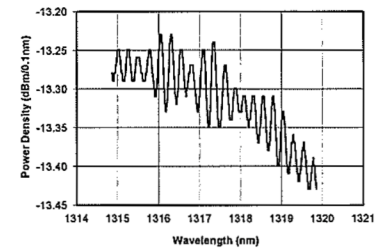
d) Power vs Wavelength

Testing condition  
 $T_{ambient}$  : 25° C  
 $T_{TEC}$  : 25° C  
 $I_{op}$  : 350mA  
 Resolution: 0.1nm



e) Spectrum Ripple vs Wavelength

Testing condition  
 $T_{ambient}$  : 25° C  
 $T_{TEC}$  : 25° C  
 $I_{op}$  : 350 mA  
 Resolution: 0.1nm  
 Ripple : 0.1dB



# A.11 Katalogový list HY-ASE-C-G-13-M-FA

SHENZHEN HOYATEK CO., LTD.

Test Report

## Data sheet

Name: ASE Broadband Light Source

Item No.: HY-ASE-C-G-13-M-FA

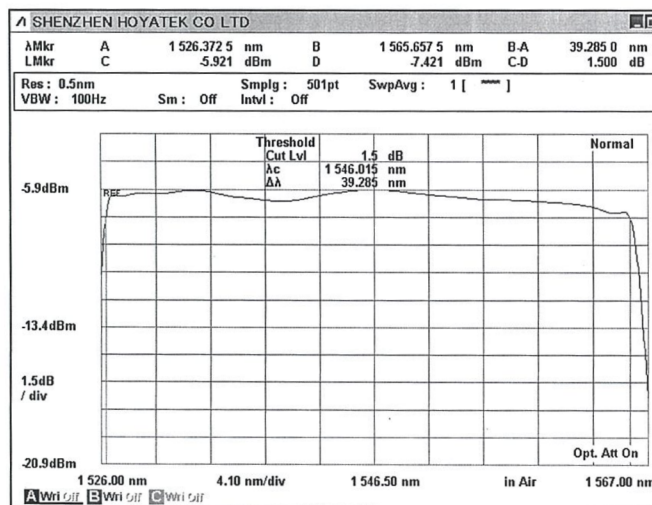
Serial No.: A20141100584



Specification	Standard	Test
Operating wavelength nm	1527-1565	1527~1565
Output power dBm	13	13.22
Long-term stability (dB) (8h)	≤0.02	0.0171
Short-term stability (dB) (5min)	≤0.01	0.0062
Spectral ripple (dB)	≤0.05	0.04
38nm Bandwidth Flatness	≤1.5	1.4
Operating temperature ℃		-20~+65
Storage temperature ℃		-40~+65
Connector type		FC/APC
Power supply		+3.3V~5V /1W (red connect positive pole, black connect ground)
Dimension (mm)		100*70*19

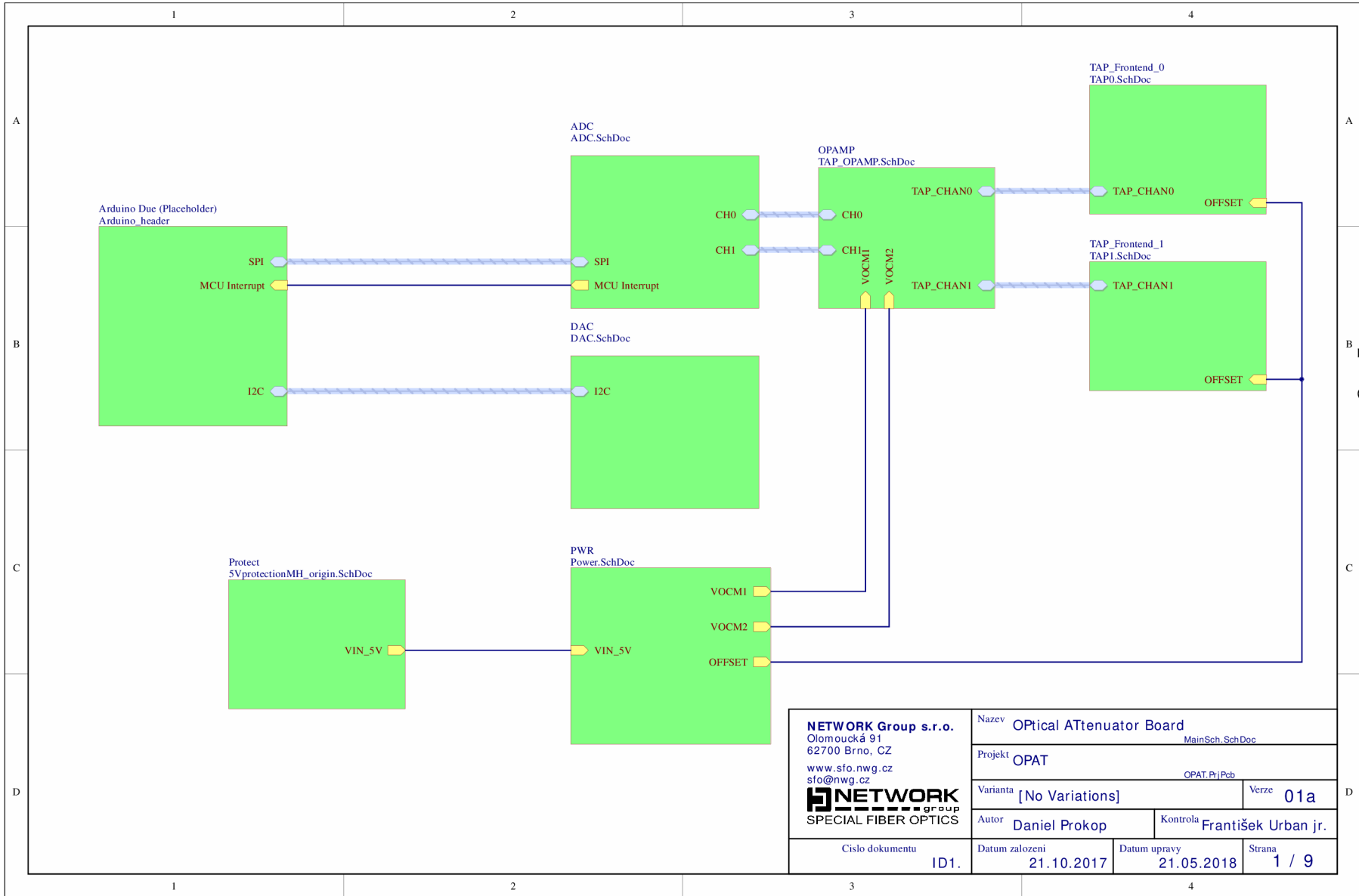
Note: Ripple test conditions: RES=0.03nm VBW=100Hz

Spectrum:

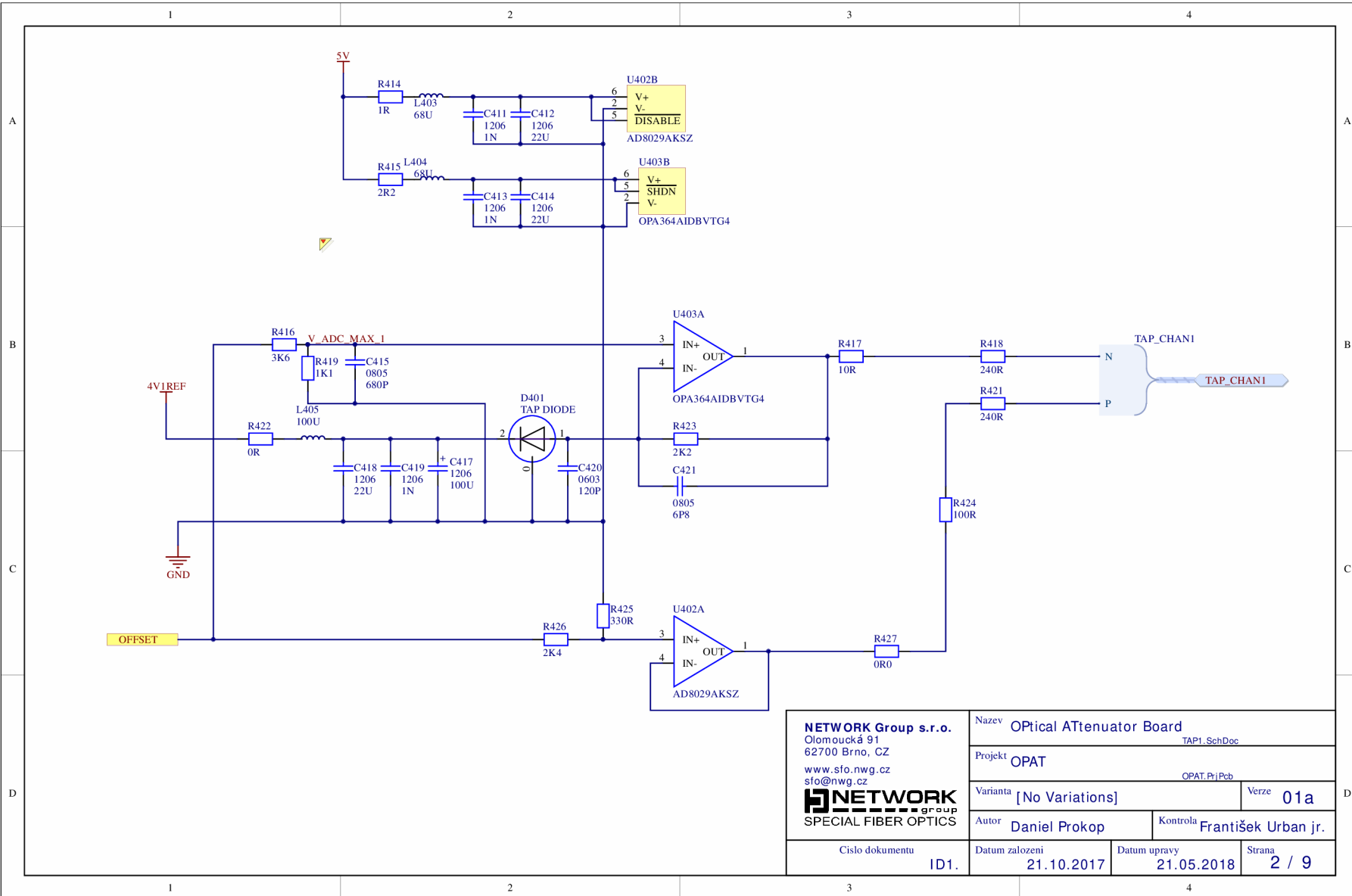


No.1101, Shenzhen University-Town Business Park, Lishan Road, Shenzhen, China. (Postalcode:518055)  
Tel: 86-755-33010353 fax:86-755-86635053  
Http://www.hoyatek.com

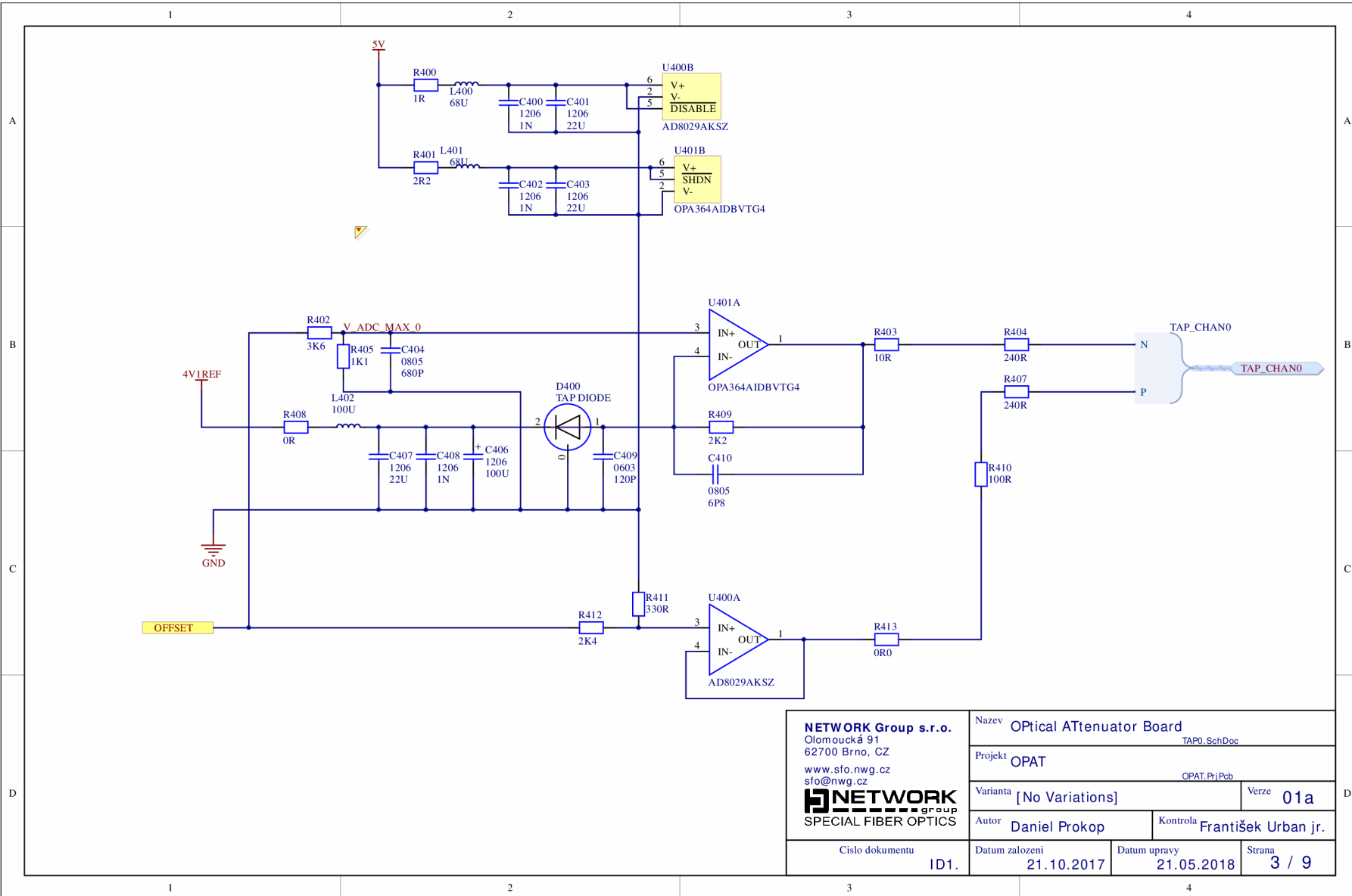
2



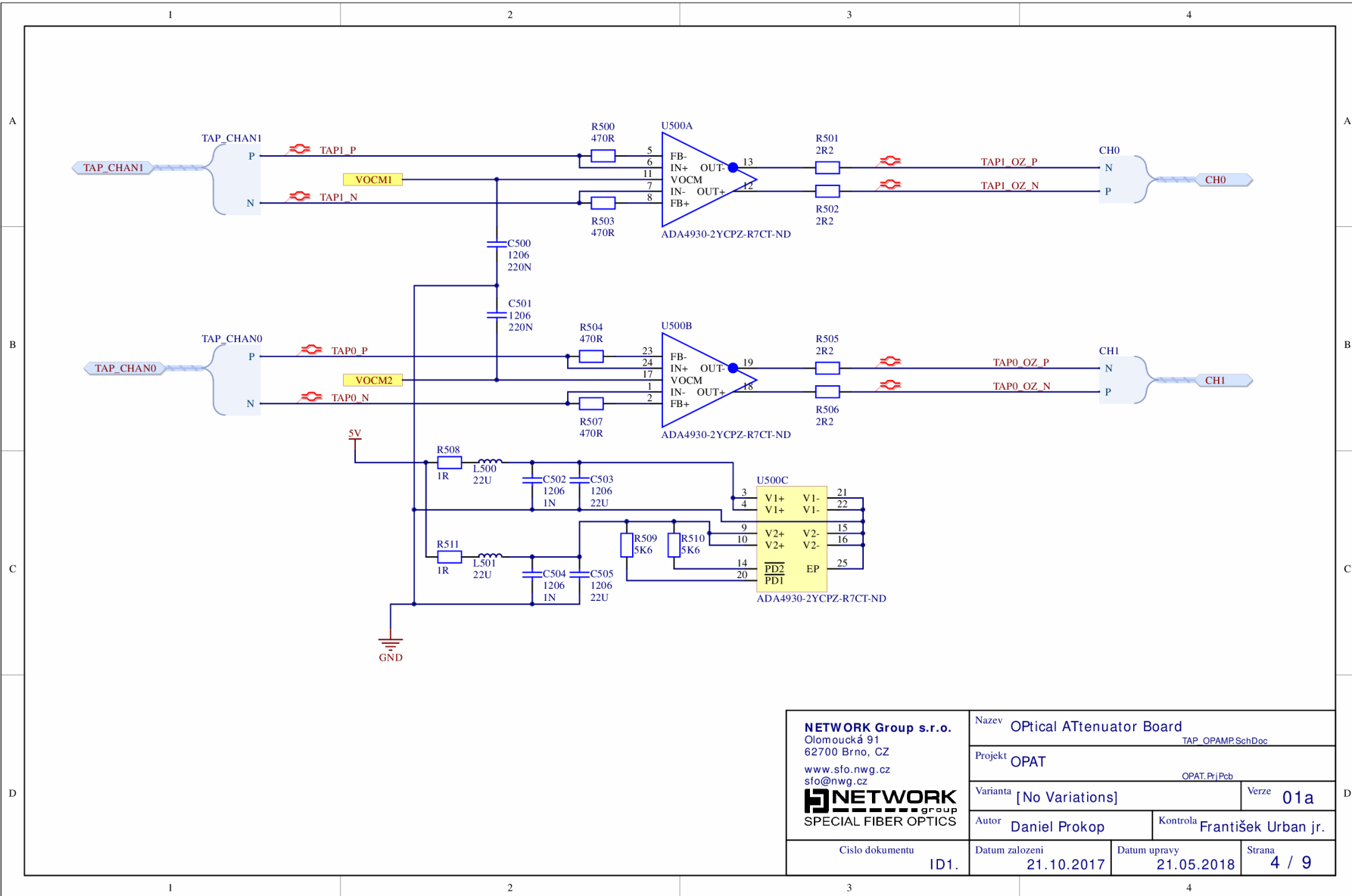
<b>NETWORK Group s.r.o.</b> Olomoucká 91 62700 Brno, CZ www.sfo.nwg.cz sfo@nwg.cz  SPECIAL FIBER OPTICS	Nazev <b>Optical Attenuator Board</b> <small>MainSch_SchDoc</small>		
	Projekt <b>OPAT</b> <small>OPAT.PrjPeb</small>		
	Varianta <b>[No Variations]</b>	Verze <b>01a</b>	
	Autor <b>Daniel Prokop</b>	Kontrola <b>František Urban jr.</b>	
Cislo dokumentu <b>ID1.</b>	Datum zalozeni <b>21.10.2017</b>	Datum upravy <b>21.05.2018</b>	Strana <b>1 / 9</b>



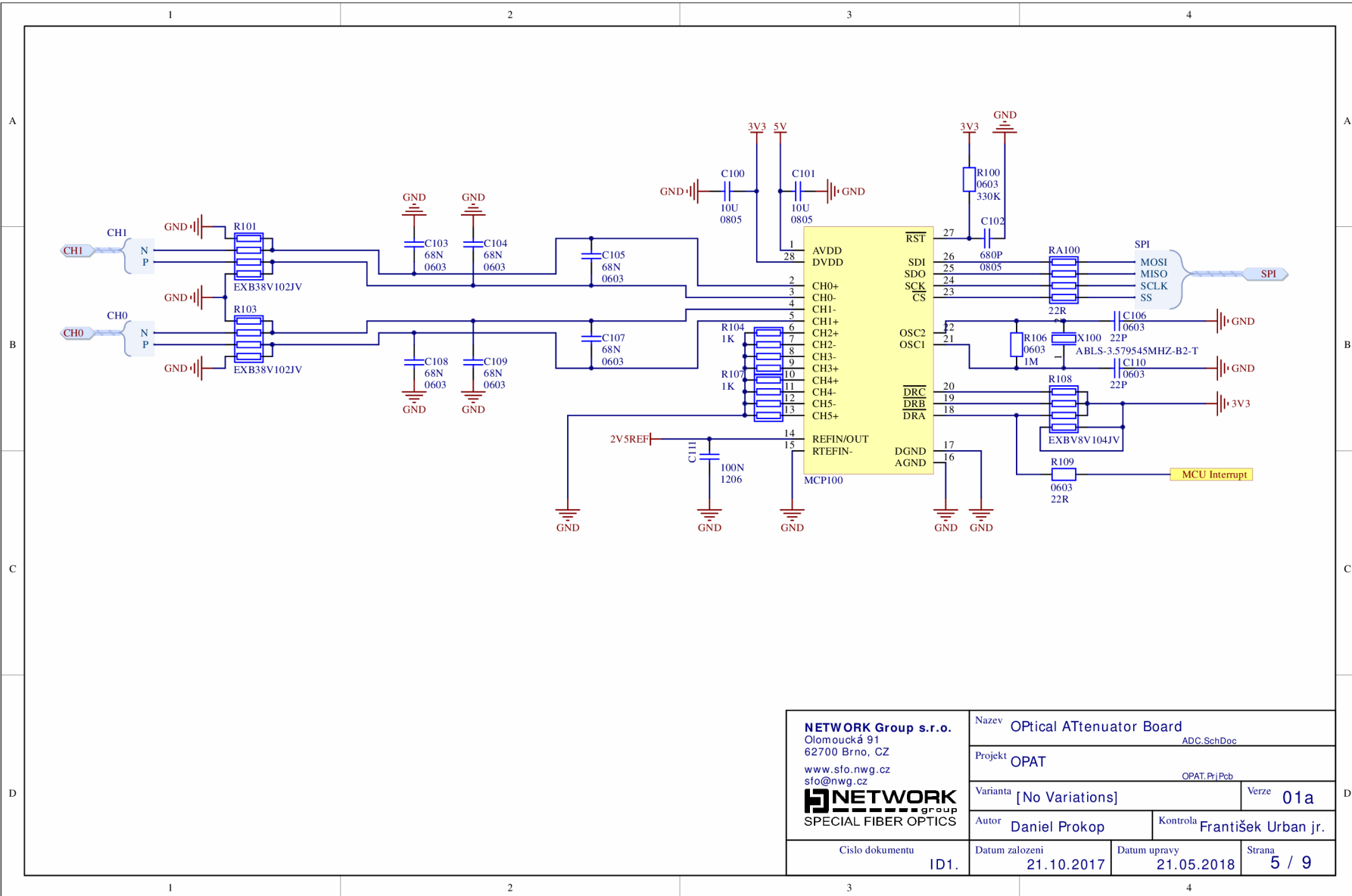
<b>NETWORK Group s.r.o.</b> Olomoucká 91 62700 Brno, CZ www.sfo.nwg.cz sfo@nwg.cz  <b>SPECIAL FIBER OPTICS</b>	Namev <b>Optical Attenuator Board</b> <small>TAP1_SchDoc</small>		
	Projekt <b>OPAT</b> <small>OPAT.PrjPeb</small>		
	Varianta <b>[No Variations]</b>	Verze <b>01a</b>	
	Autor <b>Daniel Prokop</b>	Kontrola <b>František Urban jr.</b>	
Cislo dokumentu <b>ID1.</b>	Datum zalozeni <b>21.10.2017</b>	Datum upravy <b>21.05.2018</b>	Strana <b>2 / 9</b>



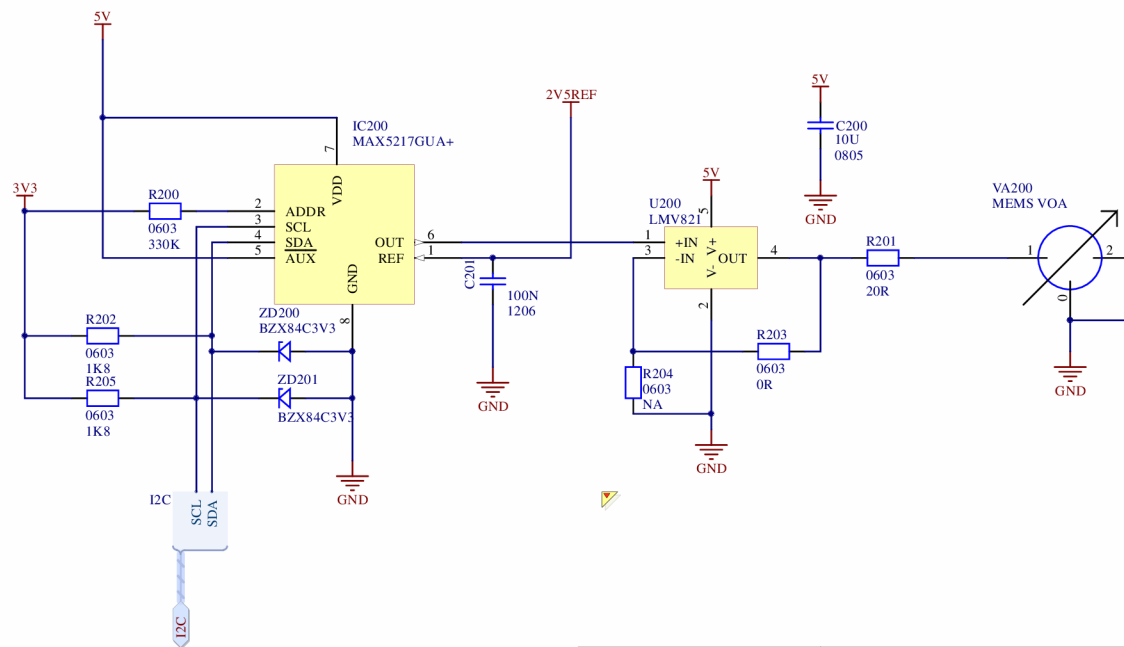
<b>NETWORK Group s.r.o.</b> Olomoucká 91 62700 Brno, CZ www.sfo.nwg.cz sfo@nwg.cz  <b>SPECIAL FIBER OPTICS</b>	Název <b>Optical Attenuator Board</b> <small>TAP0_SchDoc</small>		
	Projekt <b>OPAT</b> <small>OPAT.PrjPeb</small>		
	Varianta <b>[No Variations]</b>	Verze <b>01a</b>	
	Autor <b>Daniel Prokop</b>	Kontrola <b>František Urban jr.</b>	
Číslo dokumentu <b>ID1.</b>	Datum založení <b>21.10.2017</b>	Datum úpravy <b>21.05.2018</b>	Strana <b>3 / 9</b>



<b>NETWORK Group s.r.o.</b> Olomoucká 91 62700 Brno, CZ www.sfo.nwg.cz sfo@nwg.cz  <b>SPECIAL FIBER OPTICS</b>	Nazev <b>Optical Attenuator Board</b> <small>TAP_OPAMP.SchDoc</small>		
	Projekt <b>OPAT</b> <small>OPAT.PriPeb</small>		
	Varianta <b>[No Variations]</b>	Verze <b>01a</b>	
	Autor <b>Daniel Prokop</b>	Kontrola <b>František Urban jr.</b>	
Cislo dokumentu <b>ID1.</b>	Datum zalozeni <b>21.10.2017</b>	Datum upravy <b>21.05.2018</b>	Strana <b>4 / 9</b>

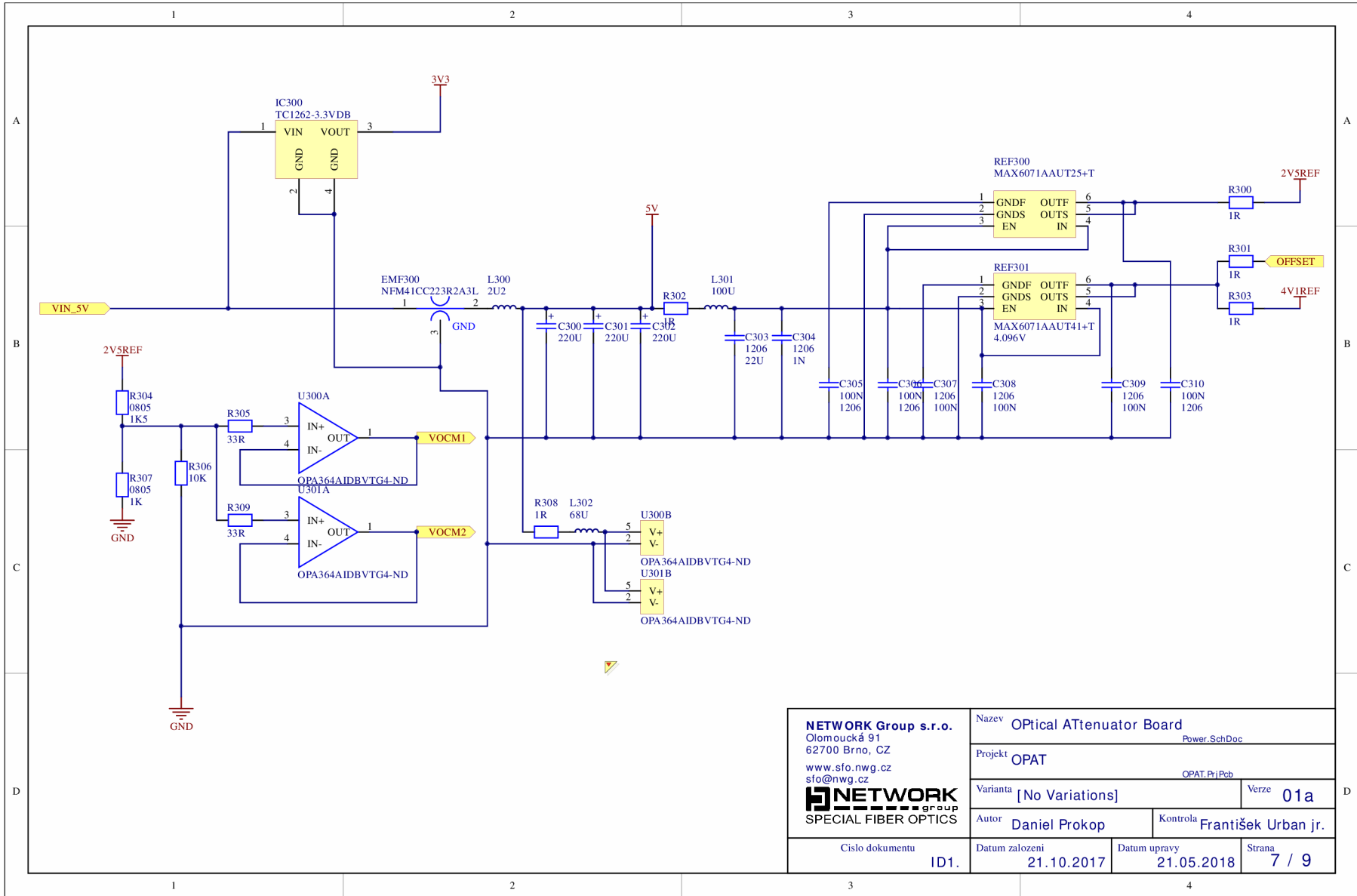


<b>NETWORK Group s.r.o.</b> Olomoucká 91 62700 Brno, CZ www.sfo.nwg.cz sfo@nwg.cz  <b>SPECIAL FIBER OPTICS</b>	Navev <b>Optical Attenuator Board</b> <small>ADC.SchDoc</small>		
	Projekt <b>OPAT</b> <small>OPAT.PrjPeb</small>		
	Varianta <b>[No Variations]</b>	Verze <b>01a</b>	
	Autor <b>Daniel Prokop</b>	Kontrola <b>František Urban jr.</b>	
Cislo dokumentu <b>ID1.</b>	Datum zalozeni <b>21.10.2017</b>	Datum upravy <b>21.05.2018</b>	Strana <b>5 / 9</b>

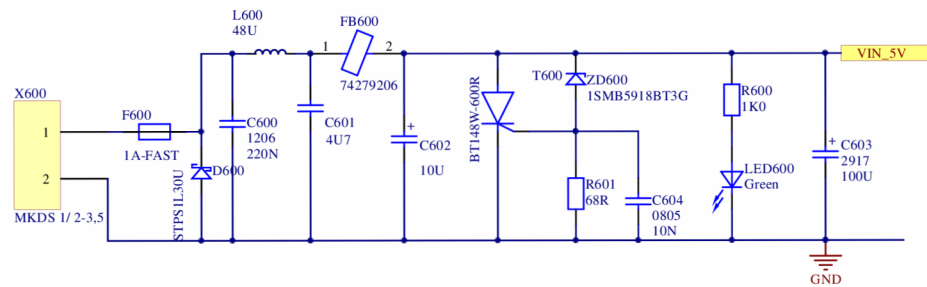


<b>NETWORK Group s.r.o.</b> Olomoucká 91 62700 Brno, CZ www.sfo.nwg.cz sfo@nwg.cz  <b>SPECIAL FIBER OPTICS</b>	Namev <b>Optical Attenuator Board</b> <small>DAC.SchDoc</small>		
	Projekt <b>OPAT</b> <small>OPAT.PriPeb</small>		
	Varianta <b>[No Variations]</b>	Verze <b>01a</b>	
	Autor <b>Daniel Prokop</b>	Kontrola <b>František Urban jr.</b>	
Cislo dokumentu <b>ID1.</b>	Datum zalozeni <b>21.10.2017</b>	Datum upravy <b>21.05.2018</b>	Strana <b>6 / 9</b>

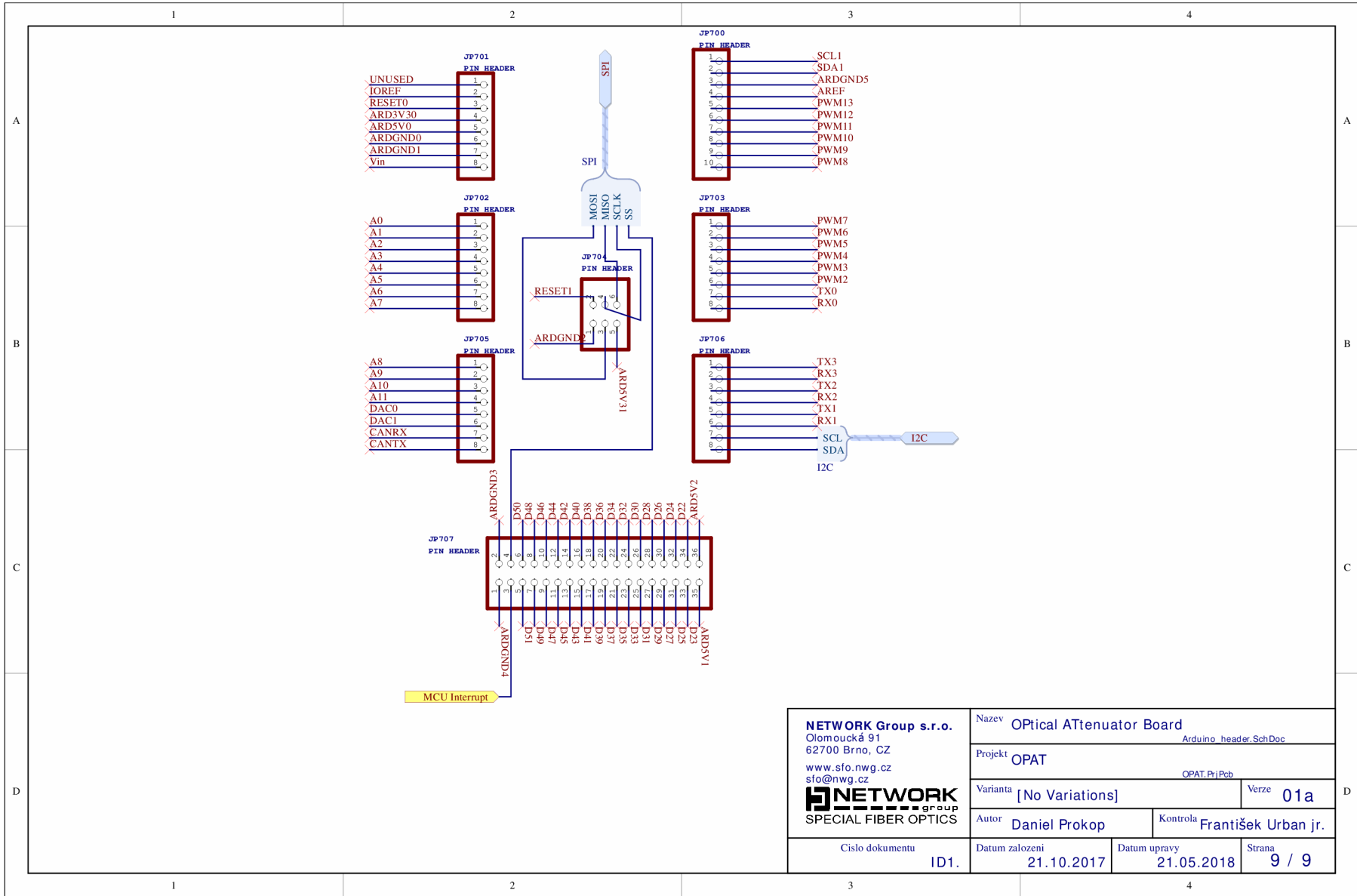




<b>NETWORK Group s.r.o.</b> Olomoucká 91 62700 Brno, CZ www.sfo.nwg.cz sfo@nwg.cz  <b>SPECIAL FIBER OPTICS</b>	Nazev <b>Optical Attenuator Board</b> <small>Power.SchDoc</small>		
	Projekt <b>OPAT</b> <small>OPAT.PrjPeb</small>		
	Varianta <b>[No Variations]</b>	Verze <b>01a</b>	
	Autor <b>Daniel Prokop</b>	Kontrola <b>František Urban jr.</b>	
Cislo dokumentu <b>ID1.</b>	Datum zalozeni <b>21.10.2017</b>	Datum upravy <b>21.05.2018</b>	Strana <b>7 / 9</b>



<b>NETWORK Group s.r.o.</b> Olomoucká 91 62700 Brno, CZ www.sfo.nwg.cz sfo@nwg.cz  SPECIAL FIBER OPTICS	Nazev <b>Optical ATtenuator Board</b> <small>5VprotectionMH_origin.SchDoc</small>		
	Projekt <b>OPAT</b> <small>OPAT.PrjPcb</small>		
	Varianta <b>[No Variations]</b>	Verze <b>01a</b>	
	Autor <b>Daniel Prokop</b>	Kontrola <b>František Urban jr.</b>	
Cislo dokumentu <b>ID1.</b>	Datum zalozeni <b>21.10.2017</b>	Datum upravy <b>21.05.2018</b>	Strana <b>8 / 9</b>



<b>NETWORK Group s.r.o.</b> Olomoucká 91 62700 Brno, CZ www.sfo.nwg.cz sfo@nwg.cz  SPECIAL FIBER OPTICS	Namev <b>Optical Attenuator Board</b> <small>Arduino_header.SchDoc</small>		
	Projekt <b>OPAT</b> <small>OPAT.PriPeb</small>		
	Varianta <b>[No Variations]</b>	Verze <b>01a</b>	
	Autor <b>Daniel Prokop</b>	Kontrola <b>František Urban jr.</b>	
Cislo dokumentu <b>ID1.</b>	Datum zalozeni <b>21.10.2017</b>	Datum upravy <b>21.05.2018</b>	Strana <b>9 / 9</b>

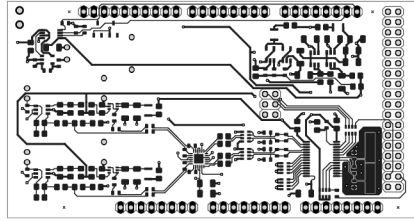
# A.13 Deska plošných spojů

**LAYER USAGE**

Top

Outline  
Multi-Layer  
Ref  
Dimensions

DR Drawing



**BUILD STATISTICS**

GENERAL 197

LANDS  
PAGE: 570  
VWS: 73

PRINT SCALE: REF SCALE: 1:00  
SCALE: REF SCALE: 1:00  
PRINT DATE: 21.05.2018  
PRINT TIME: 11:47:54

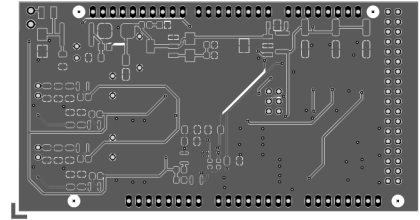
Symbol	Hit Count	Finished Hole Size	Plated	Hole Type
O	2	1,3mm	PTH	Round
X	4	3,0mm	PTH	Round
□	12	1,0mm	PTH	Round
⊗	77	0,3mm	PTH	Round
▽	92	1,0mm	PTH	Round
<b>187 Total</b>				

**LAYER USAGE**

Bottom

Outline  
Multi-Layer  
Ref  
Dimensions

DR Drawing



**BUILD STATISTICS**

GENERAL 197

LANDS  
PAGE: 570  
VWS: 73

PRINT SCALE: REF SCALE: 1:00  
SCALE: REF SCALE: 1:00  
PRINT DATE: 21.05.2018  
PRINT TIME: 11:47:55

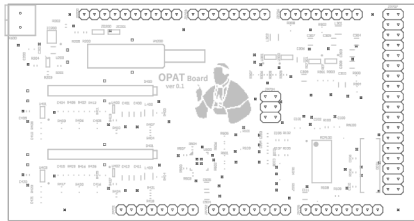
Symbol	Hit Count	Finished Hole Size	Plated	Hole Type
O	2	1,3mm	PTH	Round
X	4	3,0mm	PTH	Round
□	12	1,0mm	PTH	Round
⊗	77	0,3mm	PTH	Round
▽	92	1,0mm	PTH	Round
<b>187 Total</b>				

**LAYER USAGE**

Top Overlay

Outline  
Multi-Layer  
Ref  
Dimensions

DR Drawing



**BUILD STATISTICS**

GENERAL 197

LANDS  
PAGE: 570  
VWS: 73

PRINT SCALE: REF SCALE: 1:00  
SCALE: REF SCALE: 1:00  
PRINT DATE: 21.05.2018  
PRINT TIME: 11:47:56

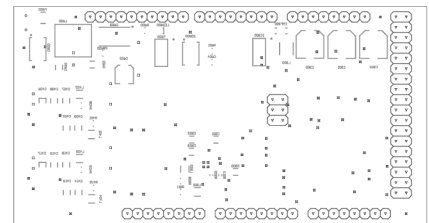
Symbol	Hit Count	Finished Hole Size	Plated	Hole Type
O	2	1,3mm	PTH	Round
X	4	3,0mm	PTH	Round
□	12	1,0mm	PTH	Round
⊗	77	0,3mm	PTH	Round
▽	92	1,0mm	PTH	Round
<b>187 Total</b>				

**LAYER USAGE**

Bottom Overlay

Outline  
Multi-Layer  
Ref  
Dimensions

DR Drawing



**BUILD STATISTICS**

GENERAL 197

LANDS  
PAGE: 570  
VWS: 73

PRINT SCALE: REF SCALE: 1:00  
SCALE: REF SCALE: 1:00  
PRINT DATE: 21.05.2018  
PRINT TIME: 11:47:57

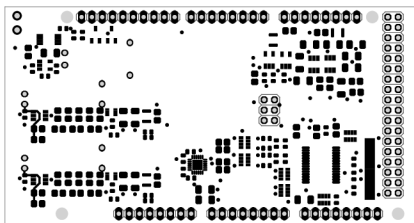
Symbol	Hit Count	Finished Hole Size	Plated	Hole Type
O	2	1,3mm	PTH	Round
X	4	3,0mm	PTH	Round
□	12	1,0mm	PTH	Round
⊗	77	0,3mm	PTH	Round
▽	92	1,0mm	PTH	Round
<b>187 Total</b>				

**LAYER USAGE**

Top Solder

Outline  
Multi-Layer  
Ref  
Dimensions

DR Drawing



**BUILD STATISTICS**

GENERAL 197

LANDS  
PAGE: 570  
VWS: 73

PRINT SCALE: REF SCALE: 1:00  
SCALE: REF SCALE: 1:00  
PRINT DATE: 21.05.2018  
PRINT TIME: 11:47:57

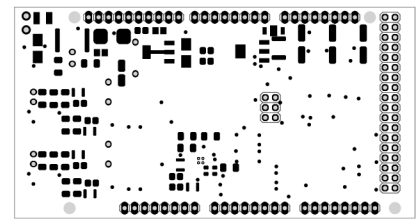
Symbol	Hit Count	Finished Hole Size	Plated	Hole Type
O	2	1,3mm	PTH	Round
X	4	3,0mm	PTH	Round
□	12	1,0mm	PTH	Round
⊗	77	0,3mm	PTH	Round
▽	92	1,0mm	PTH	Round
<b>187 Total</b>				

**LAYER USAGE**

Bottom Solder

Outline  
Multi-Layer  
Ref  
Dimensions

DR Drawing



**BUILD STATISTICS**

GENERAL 197

LANDS  
PAGE: 570  
VWS: 73

PRINT SCALE: REF SCALE: 1:00  
SCALE: REF SCALE: 1:00  
PRINT DATE: 21.05.2018  
PRINT TIME: 11:47:58

Symbol	Hit Count	Finished Hole Size	Plated	Hole Type
O	2	1,3mm	PTH	Round
X	4	3,0mm	PTH	Round
□	12	1,0mm	PTH	Round
⊗	77	0,3mm	PTH	Round
▽	92	1,0mm	PTH	Round
<b>187 Total</b>				