VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

OPTOVLÁKNOVÝ SENSOR NA PRINCIPU VÍCEMÓDOVÉ INTERFERENCE
FIBER-OPTIC SENSOR BASED ON MULTI-MODE INTERFERENCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Bc. Michal Hedl

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Michal Hedl ***ID:*** 208290
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Optovláknový sensor na principu vícemódové interference

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh optovláknového snímače využívajícího vícemódovou interferenci a realizace vhodné metody zpracování signálu.
Zadání lze shrnout do následujících bodů:
1) Zpracujte literární rešerši principů a aplikací optovláknových sensorů využívajících vícemódovou interferenci (zejména SMS struktur).
2) Pokuste se simulovat chování šíření záření v SM optickém vlákně a interference jednotlivých módů v MM vlákně pomocí dostupných simulačních nástrojů.
3) Navrhněte a realizujte automatizované měřicí pracoviště pro měření absorpčního spektra v závislosti na působení měřených fyzikálních veličin.
4) S pomocí zadaných dat navrhněte a realizujte metodu pro vyhodnocení dané fyzikální veličiny na základě změny výstupního spektra SMS struktury.
5) Diskutujte a navrhněte vhodné zjednodušení metody bez použití OSA a výsledky obou metod srovnejte. Pokuste se navrhnout koncept řešení pro využití snímače v praxi a srovnejte s jinými principy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. UDD, Eric; SPILLMAN JR, William B. (ed.). Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. John Wiley & Sons, 2011.

2. WU, Qiang, et al. The use of a bend singlemode–multimode–singlemode (SMS) fibre structure for vibration sensing. Optics & Laser Technology, 2014, 63: 29-33.

Termín zadání: 3.2.2020 ***Termín odevzdání:*** 1.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.
Konzultant: Ing. Michal Skalský

doc. Ing. Václav Jirsík, 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

Diplomová práce se zaměřuje na měření fyzikálních veličin pomocí optovláknových senzorů na principu vícemódové interference. Za cíl si klade určit vhodnou metodu zpracování signálu ze spektrálního analyzátoru. Nejdříve je provedena rešerše optiky, optických jevů a vláken. Je probrána základní teorie nutná pro realizaci měření, principy optovláknových senzorů a SMS (singlemode–multimode–singlemode) struktur. Poté je vytvořeno a popsáno automatizované měřicí pracoviště pro měření absorpčního spektra. Zadaná data jsou vyhodnocena umělou neuronovou sítí a je navrhnut koncept senzorů pro využití v praxi.

Klíčová slova

Vícemódová interference, SMS struktury, optická vlákna, LabVIEW, Matlab

Abstract

This diploma thesis is focused on measurement of the physical quantities by fiber optic sensors based on multimode interference. The objective is to evaluate the appropriate method of signal provided by the spectrum analyzer. Firstly, a review of optics, optical phenomena and fibers is performed. The basic theory necessary for the realization of measurements and the principal of fiber optic sensors and SMS (singlemode–multimode–singlemode) structures are discussed. Finally, the automated measuring workplace for absorption spectrum measurement is created and described. Given data are finally evaluated by an artificial neural network and a sensor concept for practical utilization is designed.

Key word

Multimode interference, SMS structure, optical fibers, LabVIEW, Matlab

Bibliografická citace

HEDL, Michal. *Optovláknový sensor na principu vícemódové interference.* Brno, 2020. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127078. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Soňa Šedivá.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Optovláknový sensor na principu vícemódové interference jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího a konzultanta diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 30. 5. 2020 ……

podpis autora

Poděkování

Mé poděkování patří vedoucí diplomové práce paní Ing. Soně Šedivé, Ph.D. a konzultantu panu Ing. Michalovi Skalskému za odborné vedení, cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za trpělivost, klid při psaní a studování podkladů.

V Brně dne 30. 5. 2020 ……

podpis autora

Obsah

1 Úvod ... 6
2 Optika ... 7
2.1 Historie (elektromagnetická vlna) ... 7
2.1.1 Základní pojmy ... 7
2.2 Rozdělení optiky ... 7
2.2.1 Paprsková optika ... 8
2.2.2 Vlnová optika ... 8
2.2.3 Elektromagnetická optika ... 8
2.3 Interference ... 9
2.4 Difrakce ... 10
2.5 Polarizace ... 10
2.6 Disperze a útlum ... 11
3 Optická vlákna ... 12
3.1 Princip optického vlákna ... 12
3.2 Módy ve vlákně ... 13
3.2.1 Počet módů ve vlákně ... 14
3.3 Numerická apertura ... 14
3.4 Typy optických vláken ... 15
3.4.1 Singlemode vlákna ... 15
3.4.2 Multimode vlákna ... 16
3.4.3 Gradientní vlákna ... 16
3.5 Optovláknové senzory ... 17
3.6 Intenzitní optovláknové senzory ... 17
3.7 Polarizační optovláknový senzor ... 17
3.8 Frekvenční optovláknové senzory ... 18
3.9 Fázové optovláknové senzory ... 19
4 Singlemode–multimode–singlemode struktury ... 20
4.1 Výroba ... 20
4.2 Propagace EM pole ... 20
4.3 SMS senzory ... 21
5 Simulace ... 23
5.1 Popis programu Comsol ... 23
5.2 Simulace Comsol ... 23
5.3 Popis programu Matlab ... 25
5.4 Simulace Matlab ... 26
6 Návrh a příprava experimentu ... 28
6.1 Mechanická část ... 29
6.1.1 Spodní díl ... 30

6.1.2 Horní díl ... 30
6.1.3 Montážní čelisti ... 31
6.1.4 Trn ... 31
7 Softwarová část ... 33
7.1 Popis uživatelského prostředí programu – front panel ... 33
7.1.1 Inicializace a nastavení programu ... 33
7.1.2 Jog mode a automatizované měření ... 34
7.1.3 Nastavení posuvů ... 35
7.1.4 Zobrazení spektra ... 36
7.2 Popis programu – block diagram ... 37
8 Vyhodnocení zadaných dat ... 41
8.1 Realizace metody pro vyhodnocení dané fyzikální veličiny ... 42
9 Vyhodnocovací metody bez použití osa ... 49
10 Koncept návrhu snímače v praxi ... 53
10.1 Optovláknový senzor s vícemódovou částí tvaru meandru ... 53
10.2 Optovláknový senzor se spirálovou vícemódovou částí ... 54
10.3 Porovnání s jinými senzory ... 56
10.3.1 Tenzometry ... 56
10.3.2 Kapacitní snímače ... 57
11 Závěr ... 58
Literatura ... 60

Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Rozdělení optiky [2] 8
Obrázek č. 2: Interference vlnění na stínítku [9] 9
Obrázek č. 3: Polarizace světla [10] 10
Obrázek č. 4: Disperze světla [11] 11
Obrázek č. 5: Průřez optického vlákna [12] 12
Obrázek č. 6: Módy vlákna vyjádřené jako superpozice módů [8] 13
Obrázek č. 7: Vlákno s malou a velkou numerickou aperturou [6] 15
Obrázek č. 8: Singlemode vlákno [13] 16
Obrázek č. 9: Multimode vlákno se skokovou změnou indexu lomu [13] 16
Obrázek č. 10: Multimode vlákno s gradientní změnou indexu lomu [13] 17
Obrázek č. 11: Braggova mřížka, mřížka s dlouhou periodou [19] 18
Obrázek č. 12: Schéma SMS struktury [16] 20
Obrázek č. 13: Distribuce světla v řezu optickým vláknem [17] 21
Obrázek č. 14: Schéma senzoru tlaku a teploty dvěma SMS sktrukturami [17] 22
Obrázek č. 15: Programové prostřední Comsol 23
Obrázek č. 16: Simulace MMF Comsol – d_core 100um, length 1 mm 24
Obrázek č. 17: Simulace SMF Comsol – d_core 2 μm, length 10 μm 25
Obrázek č. 18: Popis programového prostředí Matlab 26
Obrázek č. 19: Vstupní profil záření do MMF Matlab – d_core 100 μm, wavelength 1550 nm 26
Obrázek č. 20: Schéma experimentu 29
Obrázek č. 21: Experimentální část v laboratoři 29
Obrázek č. 22: Mechanická část – spodní díl 30
Obrázek č. 23: Mechanická část – horní díl 31
Obrázek č. 24: Mechanická část – montážní čelisti 31
Obrázek č. 25: Mechanická část – trn 32
Obrázek č. 26: Program LabVIEW – front panel aplikace 33
Obrázek č. 27: Inicializace programu – front panel aplikace 34
Obrázek č. 28: Jog mode a automatizované měření – detailní pohled 35
Obrázek č. 29: Nastavení posuvu – detailní pohled 36
Obrázek č. 30: Zobrazení spektra 36
Obrázek č. 31: Inicializace – block diagram 37
Obrázek č. 32: Nastavení výchozích parametrů 37
Obrázek č. 33: QHM a Main struktura 38
Obrázek č. 34: Step motor – automatizované měření 39
Obrázek č. 35: Aktuální poloha posuvů 39
Obrázek č. 36: Vyčítání dat z OSA 40
Obrázek č. 37: SubVI – Spect read data 40

Obrázek č. 38: Ukázka zadaných testovacích dat SMS struktury [32] 41
Obrázek č. 39: OSA – Broadband laser mode off [28] 43
Obrázek č. 40: OSA – Broadband laser mode on [28] 43
Obrázek č. 41: Topologie umělé neuronové sítě [27] 43
Obrázek č. 42: Algoritmus Polak-Ribiére Conjugate 45
Obrázek č. 43: Algoritmus Levenberg-Marquardt 45
Obrázek č. 44: Porovnání vybavování algoritmů Matlabem 46
Obrázek č. 45: Porovnání vybavování algoritmů – detail kolem 0 μm 47
Obrázek č. 46: Porovnání vybavování algoritmů – detail kolem 300 μm 47
Obrázek č. 47: Graf chyby 48
Obrázek č. 48: Návrh experimentu s laserem 49
Obrázek č. 49: Vyzařované spektrum laseru [29] 51
Obrázek č. 50: Drift vlnové délky laseru v závislosti na teplotě a proudu [29] 51
Obrázek č. 51: Koncept optovláknového senzoru – meandr 53
Obrázek č. 52: Koncept optovláknového senzoru – meandr s trnem 54
Obrázek č. 53: Koncept optovláknového senzoru – spirála 55
Obrázek č. 54: Koncept optovláknového senzoru – spirála s trnem 55

Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Specifikace laseru – při 25 °C [29] 50
Tabulka č. 2: Optické a elektrické parametry fotodiody [29] 52
Tabulka č. 3: Porovnání nákladů vyhodnocovacích metod 52

1 ÚVOD

S rozvojem průmyslu a metrologie jsou kladeny čím dál větší nároky na přesné a citlivé měření fyzikálních veličin. Ve většině odvětví se používají pro měření neoptické senzory. To především proto, že mají přijatelnou přesnost, citlivost a cenu. A právě cena je v komerčním využití mnohdy rozhodujícím kritériem. Oproti tomu optovláknové senzory mají velmi vysokou přesnost, citlivost, ale bohužel i cenu. Navzdory tomu mají své využití především ve snadno vznětlivých a výbušných prostorách například v elektrárnách nebo mlýnech. Mimo jiné díky snadné instalaci senzoru k povrchu, téměř bezúdržbovým provozem, vysokou dlouhodobou stabilitou a přesností se často tyto senzory používají i ve stavebnictví pro měření deformací a mechanického napětí.

Cílem práce je návrh optovláknového snímače využívající vícemódovou interferenci a určení vhodné metody zpracování signálu získaného z optického spektrálního analyzátoru.

Tato diplomová práce vysvětluje fyzikální teorii o optice, optických jevech a rozbor optických vláken. V práci jsou popsány základní principy optovláknových senzorů běžně dostupné na trhu. Práce je zaměřena na singlemode – multimode – singlemode (zkr. SMS) struktury, návrh a realizaci automatizovaného pracoviště pro měření útlumu určitých vlnových délek spektra. Toho útlumu je docíleno působením mechanického ohybu na strukturu. Právě pro toto měření byl vytvořen uživatelský program v programovém prostředí LabVIEW 2015 pro obsluhu celého experimentu.

Zadaná data byla vyhodnocena na zmíněné změně výstupního spektra v závislosti na různých ohybech SMS struktury. Vyhodnocení jsem realizoval pomocí umělé neuronové sítě, kde jsem porovnal učící algoritmy a zvolil pro tento typ dat ten nejvýhodnější.

Závěrečné kapitoly práce diskutují o vhodném zjednodušení metody měření fyzikální veličiny bez použití optického spektrálního analyzátoru. Dle diskuse se provede také návrh zjednodušené metody. Nakonec byly provedeny návrhy dvou konceptů senzorů měření pro využití snímače v praxi.

2 OPTIKA

2.1 Historie (elektromagnetická vlna)

Jedním z klíčových úspěchů Jamese Clerka Maxwella bylo zjištění, že světelný paprsek je postupná vlna tvořená elektrickým (**E**) a magnetickým (**B**) polem – elektromagnetická vlna – a že tedy optika, studující viditelné světlo, je součástí elektromagnetismu.

V Maxwellově době (v polovině 19. stol.) bylo viditelné, infračervené a ultrafialové světlo jediným známým druhem elektromagnetických vln. Heinrich Hertz, podnícen Maxwellovým dílem, však objevil to, co nyní nazýváme rádiovými vlnami, a zjistil, že se šíří v prostoru toutéž rychlostí jako viditelné světlo [1],

2.1.1 Základní pojmy

Index lomu je základní bezrozměrnou veličinou popisující šíření světla v různých látkách.

$$n = \frac{c_0}{v} \qquad [-] \qquad (1)$$

Kde c_0 je rychlost světla ve vakuu (299 792 458 m/s) a *v* rychlost světla v daném prostředí.

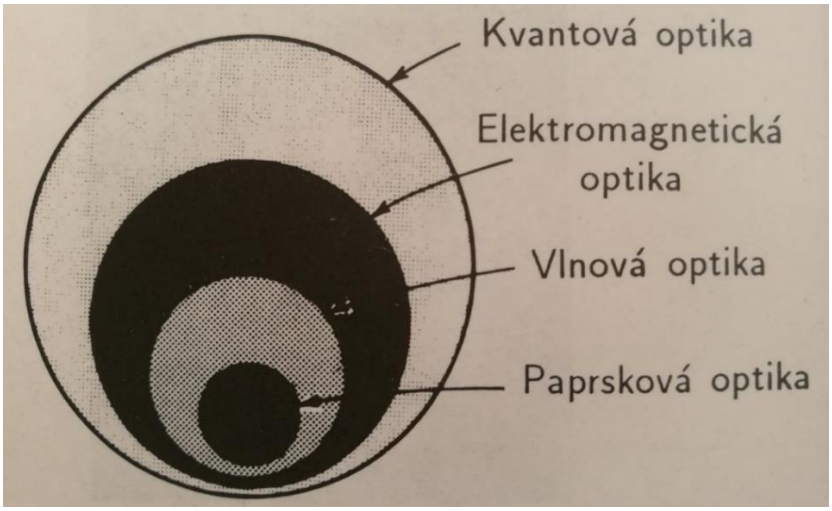
Vlnová délka je délka, kterou urazí světlo během své jedné periody.

$$\lambda = v.T = \frac{v}{f} \qquad [-] \qquad (2)$$

Kde *T* je perioda [s] a *f* frekvence [Hz] signálu a *v* rychlost světla v daném prostředí.

2.2 Rozdělení optiky

Optika se dělí do několika podskupin podle používaných metod (Obrázek č. 1): kvantová, elektromagnetická, vlnová a paprsková optika. V této práci rozebereme pouze některé typy optiky.



Obrázek č. 1: Rozdělení optiky [2]

2.2.1 Paprsková optika

Též geometrická optika, je nejjednodušší představa světla, která je reprezentována jako jeden paprsek nebo svazek paprsků. Šíří se přímočaře od zdroje světla po co nejkratší dráze od jednoho bodu k druhému. Pro pochopení každodenního světa je tato optika většinou dostačují. Typickým příkladem je představa světelných paprsků jako pomyslný útvar, dokáže dobře simulovat třeba laserový paprsek. Ovšem pokud se zaměříme na malé optické struktury, kde se začínají projevovat například interference nebo difrakce světla, paprsková optika je není schopna vysvětlit a tudíž na ně nelze ani použít [2]. Paprsková optika je podmnožinou vlnové optiky (Obrázek č. 1).

2.2.2 Vlnová optika

Uvažuje o světle jako o vlnění na nekonečně dlouhé struně. Vlnová optika je tvořena základy vlnové teorie. Vlnovou povahu světla potvrdily fyzikální děje – interference a ohyb světla, detailněji popsány v kapitolách 2.3 a 2.4. Reprezentaci světla v prostoru uvažujeme jako vlnový vektor [2]. Vlnová optika je podmnožinou elektromagnetické optiky (Obrázek č. 1).

2.2.3 Elektromagnetická optika

Je popsána dvěma spolu souvisejícími vektorovými poli – elektrickým a magnetickým polem. Obě pole jsou vektorové funkce prostoru a času a jsou vyjádřeny pomocí Maxwellovy vlnové rovnice pro vakuum [2]. Elektromagnetická optika je podmnožinou kvantové optiky, která může sloužit k popisu všech známých optik (Obrázek č. 1).

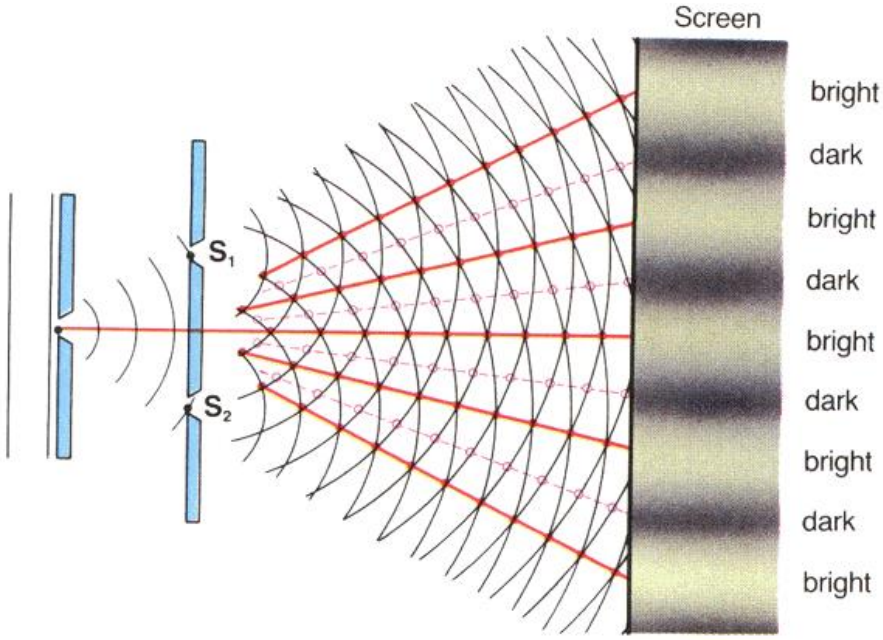
2.3 Interference

Když jsou v prostoru přítomny dvě nebo více optických vln, je výsledná vlnová funkce součtem jednotlivých vlnových funkcí (Obrázek č. 2). Tento princip superpozice plyne z linearity vlnové rovnice. V případě monochromatických vln stejné frekvence tudíž platí princip superpozice pro komplexní amplitudy. Princip superpozice nelze použít pro optické intenzity. Intenzita superpozice dvou nebo více vln nemusí být nutně součtem jejich intenzit. Důvodem tohoto rozdílu je interference mezi těmito vlnami. Interference nemůže být vysvětlena pomocí paprskové optiky, protože závisí na vztahu mezi fázemi jednotlivých skládajících se vln. Interference dvou vln se vypočítá pomocí vztahu, který je zvaný jako interferenční rovnice

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{\frac{1}{2}} \cos\varphi. \qquad [\mathrm{W/m^2}] \qquad (3)$$

Intenzita součtu dvou vln není součtem jejich intenzit, je přítomný dodatečný člen příslušný interferenci mezi oběma vlnami. Tento člen může být kladný nebo záporný, což odpovídá konstruktivní nebo destruktivní interferenci.

Za běžných světelných podmínek není interference pozorovatelná, protože náhodné fluktuace fází způsobí, že fázový rozdíl φ nabývá náhodných hodnot. Světlo s takovými náhodnými fázemi se nazývá částečně koherentní [2].



Obrázek č. 2: Interference vlnění na stínítku [9]

2.4 Difrakce

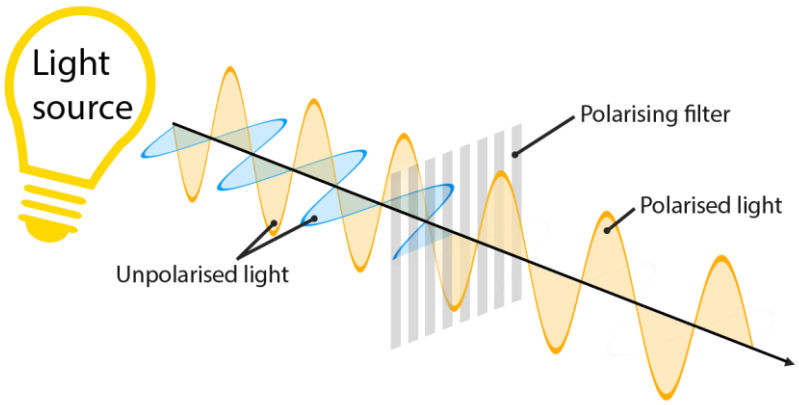
Když optická vlna projde otvorem v neprůsvitném stínítku a urazí nějakou vzdálenost ve volném prostoru, nazývá se rozložení její intenzity difrakčním obrazcem (Obrázek č. 2). Kdyby se světlo šířilo jako paprsky, byl by difrakčním obrazcem stín clony s otvorem. Vzhledem k vlnové podstatě světla se však difrakční obrazec může mírně nebo i výrazně lišit od stínu clony v závislosti na vzdálenosti mezi aperturou a rovinou pozorování, na vlnové délce a na rozměrech apertury [2].

2.5 Polarizace

Polarizace světla je určena směrem intenzity elektrického pole *E(r,t)* a jeho závislostí na čase. Pro monochromatické světlo se složky vektoru *E(r,t)* sinusově mění v čase. Jejich amplituda a fáze jsou přitom obecně různé, takže se v každém místě **r** pohybuje koncový bod vektoru *E(r,t)* v rovině, v níž opisuje elipsu. Rovina, orientace a tvar elipsy závisí obecně na poloze.

Vlny lze přibližně považovat za podélné (transverzální) EM vlny (TEM), a vektor intenzity leží přibližně v rovině kolmé k ose šíření vlny (Obrázek č. 3).

Stav elipticky polarizované vlny je závislý na orientaci a excentricitě elipsy, zatímco její rozměry jsou určeny intenzitou světla. Je-li elipsa degenerovaná na přímku (jedna z jejích os je nulová), nazýváme vlnu lineárně polarizovanou. Jestliže velikost jejích os je totožná a nenulová, nazýváme vlnu kruhově polarizovanou [3].



Obrázek č. 3: Polarizace světla [10]

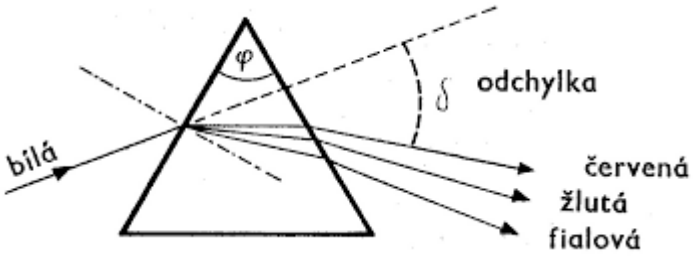
2.6 Disperze a útlum

Disperze a útlum omezují přenosové schopnosti optických vláken v datových komunikačních systémech. Zatímco útlum omezuje velikost přenášeného optického výkonu, disperze omezuje následkem časového rozšiřování přenášených optických impulsů rychlost přenosu informace vláknem [2][3].

Disperzní prostředí jsou charakterizována susceptibilitou $\chi(v)$, indexem lomu $\mathrm{n}(v)$ a rychlosti světla $\mathrm{c}(v) = c_0/n(v)$, které závisejí na frekvenci (a tedy na vlnové délce). Optické komponenty, jako jsou hranoly a čočky, zhotovené z disperzních látek, lámou vlny různých vlnových délek pod různými úhly, a rozkládají tedy polychromatické světlo, které obsahuje různé vlnové délky do různých směrů (Obrázek č. 4). Tím se vysvětluje schopnost lámavých povrchů rozlišit světlo různých vlnových délek a závislost lámavosti čoček na vlnové délce. Důsledkem toho je chromatická aberace při zobrazování.

Protože rychlost světla v disperzním prostředí závisí na frekvenci, podléhá každá z frekvenčních složek vytvářejících krátký světelný impuls různému časovému zpoždění. Je-li vzdálenost, kterou se světlo šíří prostředím, dlouhá (jako v případě šíření světla optickými vlákny), impuls se v čase rozplývá a jeho šířka se zvětšuje [2].

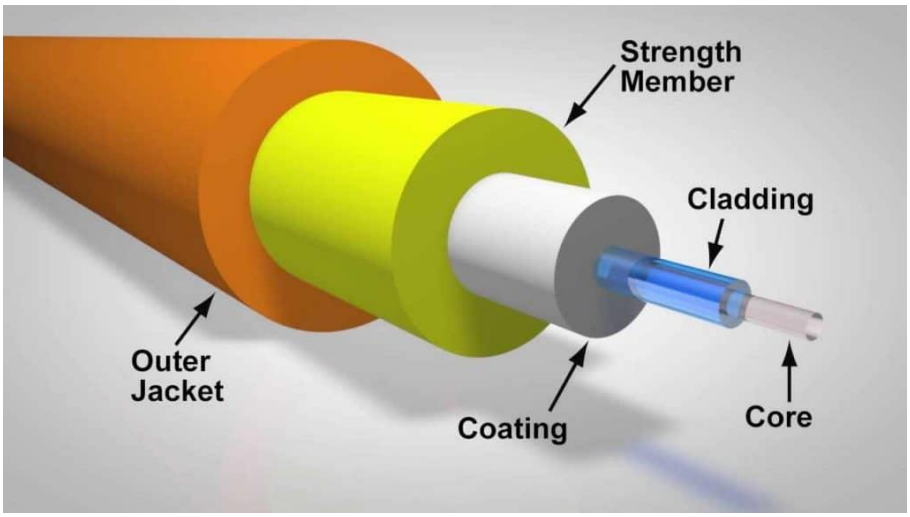
V této práci, kde se zabýváme SMS strukturami převážně malých délek optických vláken (v řádu desítek centimetrů), můžeme útlum zanedbat.



Obrázek č. 4: Disperze světla [11]

3 OPTICKÁ VLÁKNA

Pro přenos informace se ve většině případů používají metalické vodiče tvořené převážně mědí. Přenos informace optickým vláknem je rozdílný oproti metalickému především použitým médiem. U metalických vodičů je to tok elektrického proudu (elektronů), které jsou galvanicky vázány. V blízkém okolí vodiče se generuje magnetické pole, které může zapříčinit rušení signálů v jiných metalických vodičích v jeho okolí. Oproti tomu jsou optická vlákna vyrobena z plastu nebo křemenného skla. V optických vláknech (Obrázek č. 5) se používají pro přenos informace světlo, které prochází vlnovodem. Světlo na sebe nijak nepůsobí, tudíž nedochází ani k rušení mezi vlnovody. Kolem jádra vlnovodu se nachází plášť, případně u telekomunikačních vlnovodů i další ochranné vrstvy.



Obrázek č. 5: Průřez optického vlákna [12]

3.1 Princip optického vlákna

Optické vlákno (zkr. OPV) je v podstatě válcový dielektrický vlnovod zhotovený z nějakého nízkoztrátového materiálu, například křemenného skla. Vlákno je tvořeno jádrem, přenášející záření a obalem, v kterém je jádro uloženo. Obal je tvořen z opticky nevodivého materiálu s nepatrně nižší hodnotou indexu lomu. Paprsky dopadající na rozmezí jádra a pláště pod menším úhlem, než je úhel mezní, se totálně odrážejí zpět do jádra, aniž by na rozhraní docházelo k jejich lomu. Paprsky svírající s osou vlákna větší úhel se na rozhraní částečně lámou a část přenášeného výkonu se ztrácí do obalu, kde je přeměněn na teplo.

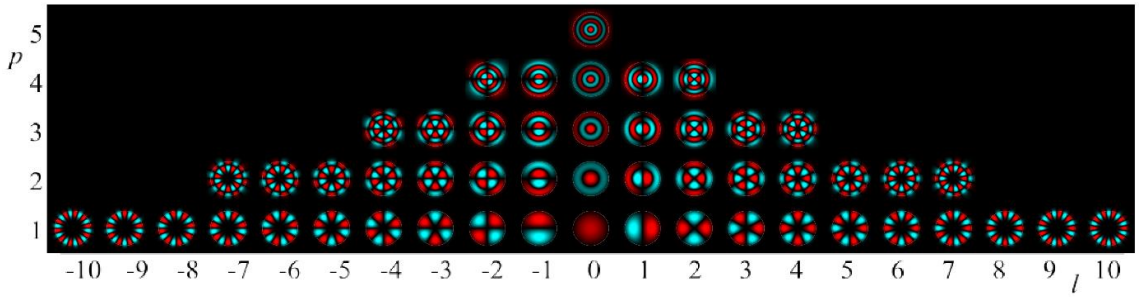
Optická vlákna mohou například v komunikacích nahradit měděné koaxiální kabely. Jejich předností se stala galvanická nevodivost. Proto se dnes hojně využívají jako optovláknové senzory (zkr. OVS), v gyroskopech a hydrofonech, kde naprosto

nahradily dosavadní senzory, ale také v pozemních komunikačních systémech na velké vzdálenosti. Elektromagnetické (zkr. EM) záření se v optických vláknech šíří ve formě módů nebo též vidů. Každý mód šířící se podél osy vlnovodu má určitou hodnotu konstanty šíření a grupové rychlosti, zachovává si své příčné rozložení a polarizaci. Je-li průměr jádra dostatečně malý, může se jím šířit pouze jediný mód. Pak hovoříme o tzv. jednomódovém vlákně (anglicky singlemode fiber). Vlákna s vyšším průměrem jádra jsou vícemódová (anglicky multimode fiber). Jeden z problémů objevující se při šíření vícemódovými optickými vlákny vyplývá z různé grupové rychlosti jednotlivých módů, což má za následek jejich různé doby průchodu vláknem. Při šíření impulsu vláknem tedy dojde k jeho rozšíření. Tento jev se nazývá módová disperze [3].

3.2 Módy ve vlákně

Elektromagnetické pole se ve vlnovodu specificky rozdělí do módů (Obrázek č. 6). Libovolné pole ve vlnovodu lze vyjádřit jako lineární kombinaci několika módů, podobně jako lze součtem harmonických signálů vyjádřit jakýkoliv průběh funkce signálu, tak lze podobně pomocí lineární kombinace módů popsat libovolné pole ve všech bodech vlnovodu [3].

Geometrická optika funguje dobře jen pro vlákna s velkým průměrem. Jestliže je ale poloměr vlákna srovnatelný s vlnovou délkou světla, nebude už poskytovat dobrý popis světla ve vlákně, protože se začnou výrazně projevovat vlnové vlastnosti světla. Pak už ani nelze hovořit o paprscích, které se ve vlákně šíří, odráží se od rozhraní jádro-plášť atd., ale musíme se zaměřit přímo na světelné vlny. Pro nalezení vln, které se mohou ve vlákně šířit, je třeba vyřešit Maxwellovy rovnice. Ukazuje se, že pro dané vlákno a danou vlnovou délku světla existuje vždy jen konečný počet různých vln, které se vláknem mohou šířit. Počet těchto módů neboli vidů vlákna je zhruba úměrný ploše průřezu jádra. Každý mód můžeme charakterizovat dvěma celočíselnými indexy l a p. Index l souvisí s orbitálním momentem hybnosti světla, a charakterizuje úhlovou (azimutální) závislost vlnové funkce popisující mód jako $e^{il\varphi}$. Druhý index módu, p, souvisí s počtem radiálních oscilací módu v jádře. Oba indexy l, p pak společně určují tzv. propagační konstantu β daného módu, která vyjadřuje, jak rychle se mění fáze vlny podél osy z vlákna [8].



Obrázek č. 6: Módy vlákna vyjádřené jako superpozice módů [8]

3.2.1 Počet módů ve vlákně

Pro zjištění módů ve vlákně se vychází z normalizované frekvence značené též jako V – number. Je to bezrozměrný parametr, který se často používá v kontextu s MMF. Je definován jako:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_{jádro}^2 - n_{plášť}^2} = \frac{2\pi a}{\lambda}NA, \qquad [-] \qquad (4)$$

kde λ je vlnová délka ve vakuu, a je poloměr jádra OPV a NA je numerická apertura, která je podrobněji popsána v kapitole 3.3. Pokud je V < 2,405 šířit se může jen jeden mód, kdežto pokud V > 2,405 šířit se může více módů. Počet módů v MM–SI vlákně lze určit ze vztahu [7]:

$$N_m = \frac{V^2}{2} \qquad [-] \qquad (5)$$

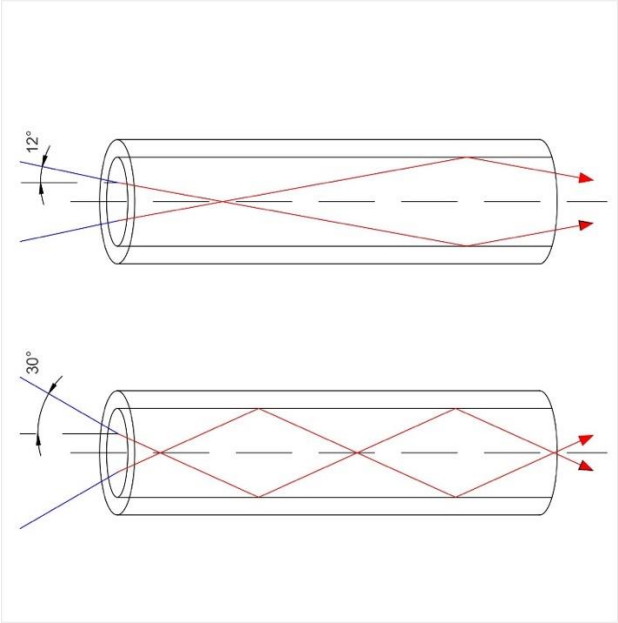
3.3 Numerická apertura

Ne každý světelný paprsek, který dopadne na přední čelo MMF je schopen se do vlákna navázat jako mód. Pokud je úhel dopadu světelného paprsku velký, dojde k jeho lomu na vnitřní straně vlákna. Světlo dopadne na rozhraní jádro – plášť pod úhlem (ke kolmici rozhraní) menším, než je úhel mezní a dochází k jeho pohlcení pláštěm. Pokud je úhel, pod kterým světlo dopadá na čelo MMF ještě vetší, dojde k jeho odrazu od čela vlákna zpět to okolí. Světlo na čelo MMF proto musí dopadat pod správným úhlem, aby se navázalo jako mód (Obrázek č. 7). Numerická apertura pro MMF lze vypočítat vztahem (6) pomocí indexu lomu a úhlu dopadu nebo pomocí vztahu (7), kde nám stačí znát pouze indexy lomu jádra a pláště [4][5].

$$NA = n_{vst}\sin(a_{vst}), \qquad [-] \qquad (6)$$

kde *NA* je numerická apertura, n_{vst} je index lomu prostředí před optickým vláknem a $\sin(a_{vst})$ je sinus úhlu paprsku vstupujícího do vlákna (měřeného od optické osy). Numerická apertura se dá také vypočítat pouze pokud známe indexy lomu jádra a pláště podle vztahu [6]:

$$NA = \sqrt{n_{jádro}^2 - n_{plášť}^2} \qquad [-] \qquad (7)$$



Obrázek č. 7: Vlákno s malou a velkou numerickou aperturou [6]

3.4 Typy optických vláken

V zásadě máme tři typy optických vláken: singlemode, multimode se skokovou změnou indexu lomu (MM–SI) a multimode s gradientní změnou indexu lomu (MM–GI) (Obrázek č. 8 – 10). Jak už z názvu vyplývá, singlemode vlákny může procházet pouze jeden mód z důvodu jejich velmi malého průměru. Vícemódová vlákna se skokovou změnou indexu lomu umožňují navázat více módů, ale vláknem se pohybují odrazy od rozhraní jádro – obal. Podrobněji je rozebereme v následujících kapitolách.

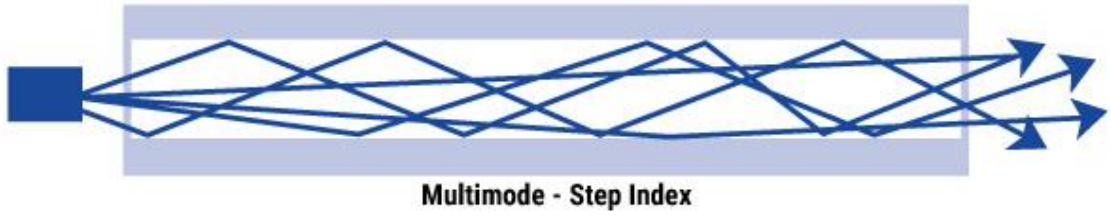
3.4.1 Singlemode vlákna

Singlemode vlákna (česky jednomódová, též jednovidová vlákna), jsou optické vlnovody s velmi malým průměrem jádra, který se pohybuje kolem 5 až 8 μm. Právě malý průměr jádra zapříčiní, že jím může procházet EM záření pouze jedním módem, a to přímo v ose vlákna (Obrázek č. 8). To se tak ve vlákně neodráží od rozhraní jádra s pláštěm, ale prochází jím přímo. Mají tak nejlepší odezvu na vstupní impuls ze všech typů OPV. Proto jsou jednomódová vlákna velmi oblíbená v pozemním přenosu dat na velké vzdálenost v řádu od pár jednotek po tisíce kilometrů vlákna.

Obrázek č. 8: Singlemode vlákno [13]

3.4.2 Multimode vlákna

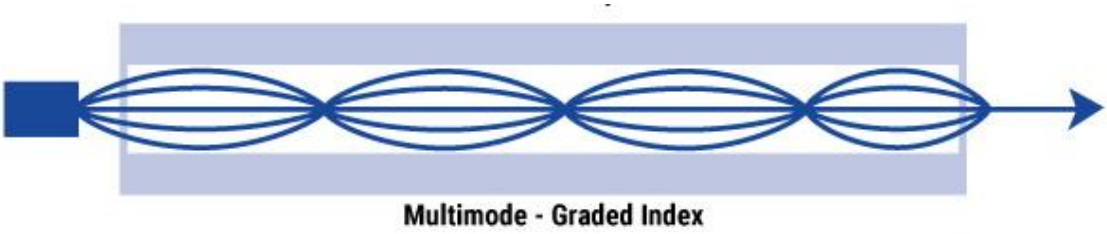
Multimode vlákna (česky vícemódová, též vícevidová vlákna) MM–SI, jsou optovláknové vodiče s průměrem zhruba od 50 µm a více (Obrázek č. 9). Větší průměr umožní, aby se do vlákna navázalo EM záření do více módů než u singlemode. Záření, které se úspěšně navázalo do čela jádra začne s rostoucí vzdáleností od čela navzájem interferovat, dochází k módové disperzi a kvůli rozdílné hodnotě indexu lomu rozhraní jádra a pláště se od něj záření začne odrážet a jeho část i pohlcovat do pláště přeměnou na teplo.



Obrázek č. 9: Multimode vlákno se skokovou změnou indexu lomu [13]

3.4.3 Gradientní vlákna

Multimóde vlákna s gradientní změnou indexu lomu jsou vlákna s rozdílnou hodnotou indexu lomu MM-GI v jeho průřezu. Stejně jako u vláken se skokovou změnou indexu lomu dochází i u gradientních k módové disperzi (Obrázek č. 10). Tu lze snížit vhodným příčným profilem indexu lomu, který má největší hodnotu v ose jádra a směrem k plášti postupně klesá, přičemž na jejich rozhraní dosáhne minima. Toto vlákno se nazývá gradientní vlákno nebo též vlákno s postupnou změnou indexu lomu. V gradientním vlákně vzrůstá rychlost šíření s rostoucí vzdáleností od osy (následkem klesajícího indexu lomu). Paprsky, které protínají osu jádra urazí sice kratší trasu, ale zato menší rychlostí než paprsky protínající osu vlákna pod větším úhlem. V důsledku toho mohou být doby průchodu paprsků optickým vláknem stejné [3].



Obrázek č. 10: Multimode vlákno s gradientní změnou indexu lomu [13]

3.5 Optovláknové senzory

V měřicí technice se převážně používají elektrické měřiče elektrických i neelektrických veličin. Po objevení optických vláken se začaly využívat také ony. Oproti konvenčním senzorům mají ty optické své výhody (galvanická nevodivost, odolnost vůči chemicky agresivnímu prostředí, ionizující záření, vysoké teploty) i nevýhody (cena).

Optovláknové senzory nikdy nedokázaly zcela nahradit ty konvenční ve všech odvětvích, většinou právě kvůli vysoké ceně. Ovšem i přesto se velmi osvědčily při měření hydrostatického tlaku (hydrofony) a jako velmi citlivé a přesné senzory úhlové rychlosti (gyroskopy).

Uplatnění OVS nalezneme především v průmyslových aplikacích jako je například stavební, energetický a dopravní průmysl. OVS můžeme rozdělit podle metody snímání neelektrických veličin. Ty základní jsou popsány v následujících kapitolách.

3.6 Intenzitní optovláknové senzory

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších typů optických senzorů. Senzory využívají změnu intenzity snímaného optického signálu. Změna intenzity optického signálu se může uskutečnit jedním z následujících způsobů [18]:

a) změnou útlumu např. při ohybu

b) změnou přechodu a odrazu světla

c) porušením okrajových podmínek šíření světelného signálu v optickém prostředí

d) změnou vzájemné vazby světlovodů

Tyto optovláknové senzory jsou velmi jednoduché a levné, ale i málo přesné.

3.7 Polarizační optovláknový senzor

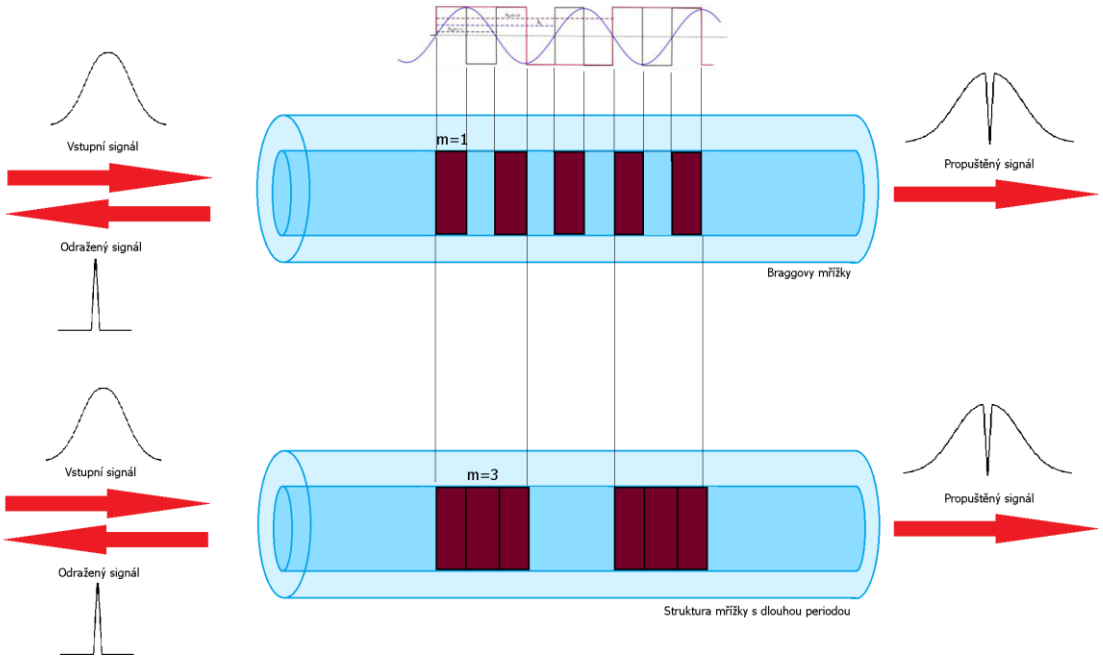
Polarizační senzory se používají převážně u OVS elektrického proudu. Polarizované světlo prochází OPV ovinutým okolo el. vodiče. Tekoucí el. proud indikuje kolem el.

vodiče magnetické pole, které mění polarizaci světla v OPV. Výsledná změna polarizace je převedena na velikost el. proudu.

3.8 Frekvenční optovláknové senzory

Frekvenční optovláknové senzory mají podél své osy jádra vytvořenou strukturu s odlišným indexem lomu než ve zbytku OPV. Ta zapříčiní rozptýlení světla. Mikrostrukturní změny indexu lomu část frekvenčního spektra zadrží a část propustí. Vzniká tak něco jako optovláknový filtr.

Na tomto principu fungují Braggovy mřížky nebo mřížky s dlouhou periodou. Mimo to se využívá i v telekomunikačních systémech.



Obrázek č. 11: Braggova mřížka, mřížka s dlouhou periodou [19]

Na (Obrázek č. 11) jsou načrtnuty dvě struktury – Braggova mřížka a mřížka s dlouhou periodou, kde jsou vidět rozdílné vnitřní vrstvy z rozdílným indexem lomu. Struktura Braggovy mřížky (s indexem m=1) má periodu změn indexu lomu přesně po půl periodě vlnové délky ve vakuu a je tak splněna tzv. Braggova podmínka difrakce. Struktura mřížky s dlouhou periodou (s indexem m=3) má v jedné periodě indexu lomu celočíselný násobek poloviny vlnové délky ve vakuu. Struktura mřížky s dlouhou periodou je podstatně jednodušší na výrobu. Oba typy těchto struktur se používají pro vyhodnocení mechanického napětí uvnitř budov nebo mostů [19].

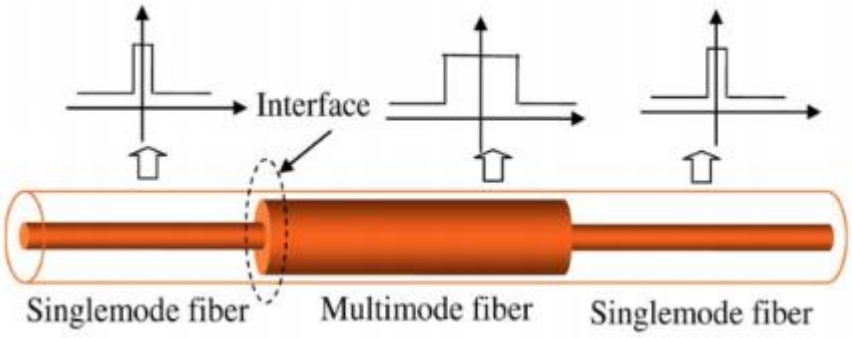
3.9 Fázové optovláknové senzory

Fázové senzory funguje na principu sledování rozdílu dvou optických svazků, respektive fázového rozdílu mezi těmito svazky. Nejjednodušší měřicí princip je rozdělit optické záření z koherentního zdroje záření do dvou singlemode vláken. Jedno vlákno je ponecháno beze změny jako referenční. Druhé vlákno je měřicí, na kterém dojde ke změně fáze. Měří se rozdíl mezi těmito fázemi pomocí interferometru. Obě vlákna by měla být stejné délky. Jde o nejpřesnější, nejsložitější a často také nejdražší metodu.

4 SINGLEMODE–MULTIMODE–SINGLEMODE STRUKTURY

4.1 Výroba

Singlemode – multimode – singlemode (SMS) struktury, jsou sktruktury spojených jednomódového – vícemódového – jednomódového optického vlákna (Obrázek č. 12). Optická vlákna před spojením je nutné důkladně očistit a na koncích provést čisté zakončení (řez) řezačkou k tomu určenou. Takto upravená vlákna se vloží do svářečky optických vláken. Svářečka umožňuje optická vlákna například i zarovnat, otočit, osově vychýlit atd., což je pro toto měření podstatné, jelikož vlákna musí být axiálně zarovnána. Ke svaření se používá elektrický oblouk, který roztaví malou vrstvu svařovaných vláken, spojí je a po vychladnutí jsou mechanicky spojena.



Obrázek č. 12: Schéma SMS struktury [16]

4.2 Propagace EM pole

Vstupní pole z SMF do MMF $E_s(r)$ můžeme zjednodušit jako pole Gaussovského profilu, potom

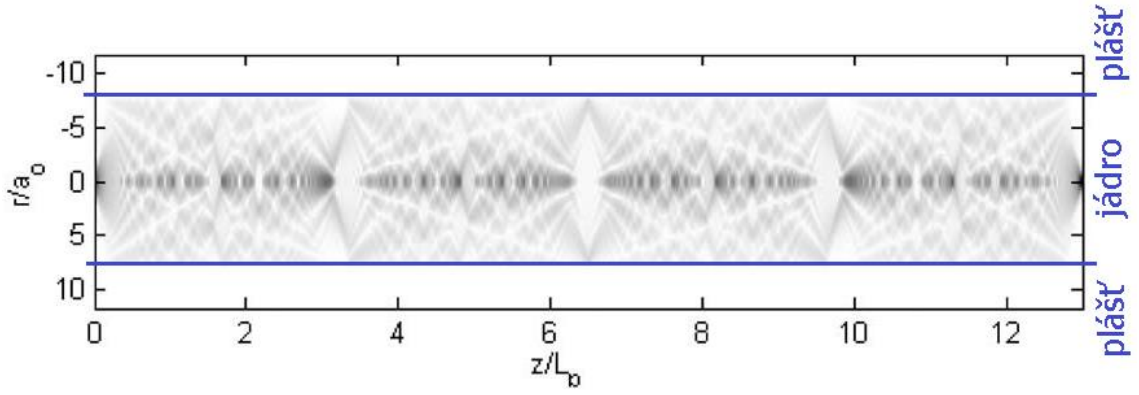
$$E_s(r) = e^{-(r/\omega)^2} e^{-i\beta_0 z}, \qquad \text{[V/m]} \qquad (8)$$

kde ω je polovina šířky v polovině maxima (HWHM) EM pole, β_0 je konstanta podélné propagace pro mód LP_{01} a udává rychlost změny fáze vlny ve směru šíření v SMF a je rovna

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda}. \qquad \text{[-]} \qquad (9)$$

EM záření vstupující do čela struktury, přesněji do SMF, jím prochází jako jeden mód v ose jádra, jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách. Na konci SMF dochází k navázání záření do MMF, do kterého vstupuje téměř jako bodový zdroj záření. V místě kde $z = 0$, je zřetelné charakteristické navázání módů do MMF (Obrázek č. 13). Zároveň dochází k multimódové interferenci, odrazům a lomům od rozhraní jádra a pláště. To

zapříčiní, že se rozložení EM pole v OPV s rostoucí vzdáleností z ve směru šíření záření mění (Obrázek č. 13).



Obrázek č. 13: Distribuce světla v řezu optickým vláknem [17]

K výpočtu koeficientů buzení vstupního pole použijeme vzorec pro výpočet součinitele navázané optické energie μ_v. Tímto součinitelem zjistíme množství energie v jednotlivých navázaných módech v MMF [17]

$$\mu_v = \frac{\left|\int_0^\infty E_s(r)E_v(r)rdr\right|^2}{\int_0^\infty |E_s(r)|^2 rdr \int_0^\infty |E_v(r)|^2 rdr}, \qquad [-] \qquad (10)$$

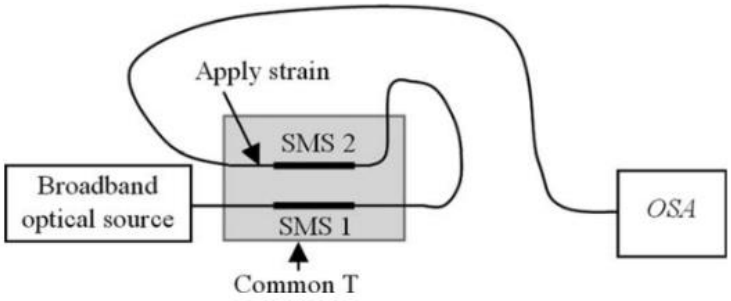
kde $E_s(r)$ je vstupní pole do MMF a $E_v(r)$ představuje distribuované pole v-tého módu v MMF. Propagace záření v MMF je ovlivněna frekvencí záření, ale také okolními vlivy jako je teplota, ohyb nebo mechanické napětí. Například ohyby vlákna mohou zapříčinit ztráty kvůli pohlcení záření do pláště, a tak změnit výstupní optickou intenzitu. Záření propagované v MMF se v SMS struktuře na konci MMF naváže opět do SMF. Optická intenzita na výstupu SMF je ovlivněna nejen už zmíněnou teplotou vlákna, makro a mikro ohyby nebo mechanickým napětím (tahem), ale také indexem lomu jádra a pláště, průměrem a délkou jádra MMF.

Jelikož má SMF daleko menší průměr jádra než MMF, do SMF se naváže pouze část záření. Zbylé se pohltí do pláště SMF, kde se promění v teplo. Velikost navázaného výkonu do SMF můžeme ovlivnit průměrem a délkou MMF. Změnou těchto parametrů ovlivníme místo v řezu na ose z, kde se záření soustředí do jednoho bodu, nebo je rozptýleno v celém průřezu MMF (Obrázek č.13).

4.3 SMS senzory

SMS struktury se díky svým vlastnostem dají dobře použít jako senzory různých fyzikálních veličin. Měřené veličiny můžeme měřit přímo nebo nepřímo. Přímo můžeme měřit například už zmíněnou teplotu, ohyby a mechanické napětí vlákna, čehož se dá využít například u tenzometrů a jiných váhových senzorů, pro měření vibrací nebo tlaku.

Ojedinělé nejsou ani senzory na principu využívající více SMS struktur. Například paralelní zapojení SMS struktur, kdy se jedno vlákno používá jako referenční a druhé jako měřicí struktura. Nebo sériové, kdy je jedna SMS struktura v klidovém stavu a druhá jako měřicí (Obrázek č.14).Výstupy z obou vláken se následně porovnávají a analyzují.



Obrázek č. 14: Schéma senzoru tlaku a teploty dvěma SMS sktrukturami [17]

Výhody:

- Vysoká přesnost
- Vysoká citlivost
- Galvanická nevodivost
- Odolnost vůči rušení
- Chemická odolnost

Nevýhody:

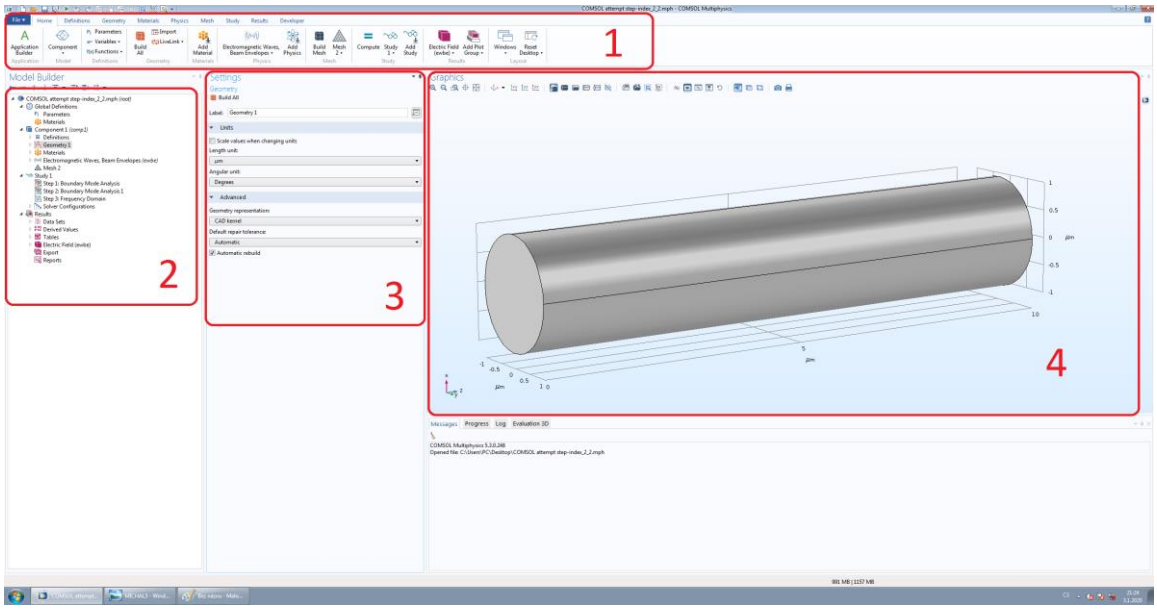
- Cena
- Složitější zpracování signálu

5 SIMULACE

Pro ověření potřebných principů a vůbec teoretické funkčnosti SMS senzorů bylo dobré je před praktickým měření nasimulovat s programovém prostředí. K tomu jsem využil převážně dvou programových prostředí – Comsol a Matlab, která budou popsána v následujících kapitolách.

5.1 Popis programu Comsol

Program Comsol [20] slouží pro návrhy a simulace různých fyzikálních jevů, včetně optiky. Tento program byl zvolen kvůli jeho dostupnosti a jeho možnostem rychle v něm namodelovat potřebný MMF.



Obrázek č. 15: Programové prostřední Comsol

Obrázek č. 15 popisuje programové prostředí Comsol. V horní části programu se nachází hlavní navigační menu (č. 1) nutné pro ovládání celého program Comsol. V navigačním stromu vlevo Model Builderu (č. 2) je možné přepínat mezi modelováním, definováním parametrů, vlastností a studií struktur, které se zadávají v části č. 3. Poslední část (č. 4) slouží pro grafické zobrazení namodelovaných struktur a výsledků simulace.

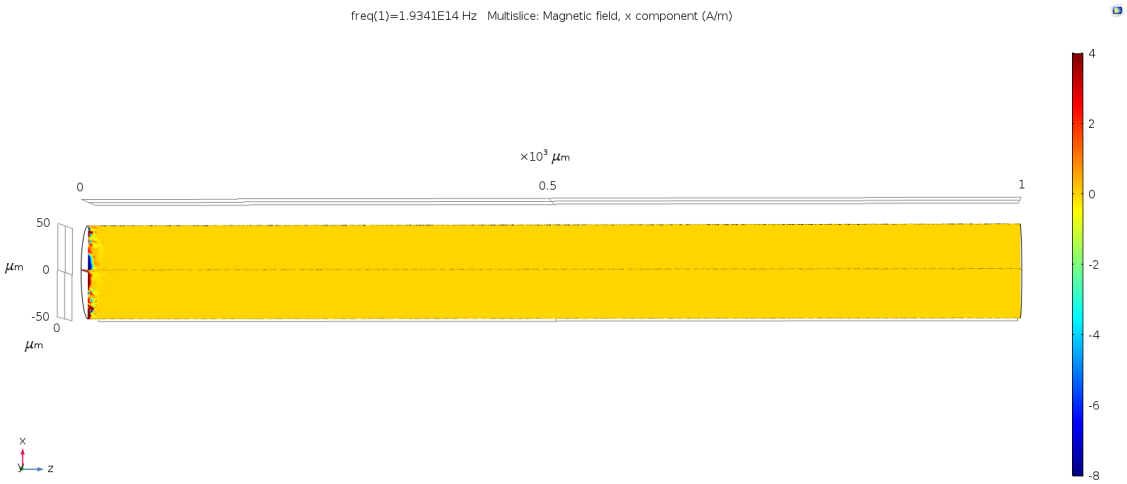
5.2 Simulace Comsol

Po založení nového projektu jsem použil Study jako *Boundary Mode Analysis* a namodelovali válcový objekt (jádro MMF). Plášť jádra nemá na výsledné měření příliš velký vliv, a proto byl prozatím kvůli výpočetní náročnosti modelu zanedbán. V simulacích jsem použil parametry jádra vícemódového optického vlákna, které bude použito pro realizaci SMS struktury.

Parametry jádra:

- d_core = 100 µm
- ni_core = 1,4446
- lambda = 1550 nm
- l_core = 1 mm

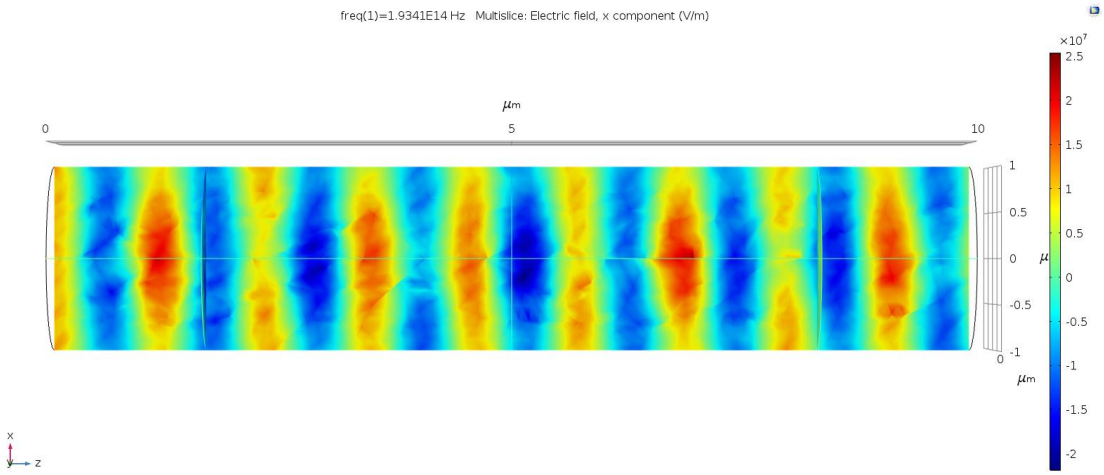
Po vymodelování následoval výběr materiálu, které bylo zvoleno jako skleněné s nastaveným indexem lomu jádra. Pro simulaci byla vhodná triangulační velikost struktury nastavena parametrem (*Mesh*) a grafické zobrazení intenzity záření na (*Electric field*) v celé délce jádra. Bohužel, výsledné šíření záření vláknem vypadalo naprosto odlišně od očekávaného výsledku. Propagaci záření bylo možné pozorovat pouze několik µm v MMF, poté se jevilo po celou délku jádra jako zcela homogenní (Obrázek č. 16).



Obrázek č. 16: Simulace MMF Comsol – d_core 100um, length 1 mm

Podobná simulace byla provedena i pro SMF s podobnými parametry jádra:

- d_core = 2 µm
- ni_core = 1,4446
- lambda = 1550 nm
- l_core = 10 µm



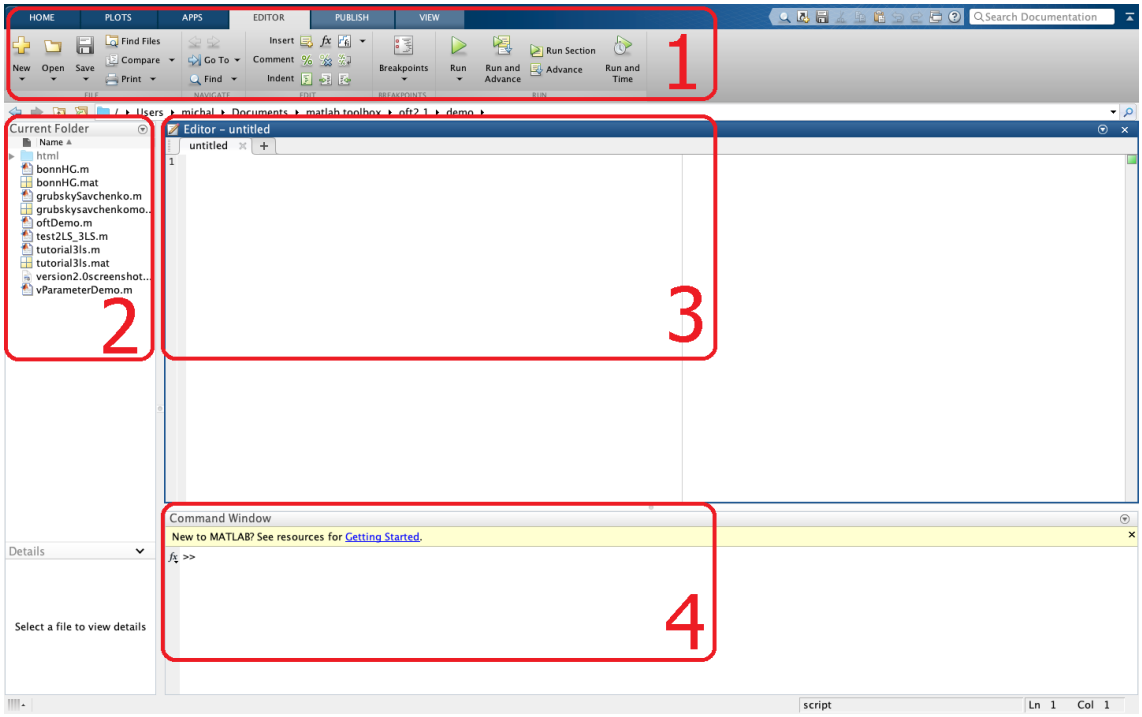
Obrázek č. 17: Simulace SMF Comsol – d_core 2 µm, length 10 µm

Obrázek č. 17 znázorňuje záření prostupující SM vláknem. Můžeme vidět měnící se intenzitu elektrického pole v ose z. Ovšem vzhledem k tomu, že vlákno má průměr SMF, nemůže se v něm vyskytovat vícero módů než jeden. Pokusy o ustálení el. pole v jádru zvětšením jeho délky se ukázaly kvůli omezenému výpočetnímu výkonu jako neproveditelné. Simulace propagace záření optickým vláknem se bohužel nepodařila zcela úspěšně zrealizovat, zřejmě kvůli malým zkušenostem s programem Comsol a nedostatečným návodem ze strany vývojáře. Z tohoto a dalších důvodů jsem se rozhodl, že program Comsol není zcela vhodný pro simulaci vícemódových interferencí uvnitř MMF.

5.3 Popis programu Matlab

Program Matlab [21] 2016b slouží jako univerzální výpočetní program. Zpočátku byl zvolen pro vykreslení vstupního Gaussovského profilu záření do jádra MMF, ovšem kvůli problémům uvedeným v předchozí kapitole byla simulace provedena v Matlabu.

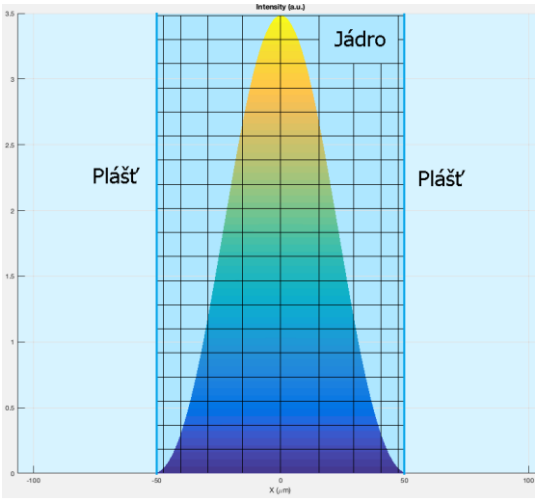
Obrázek č. 18 popisuje programové prostředí Matlab. V horní části programu se nachází hlavní navigační menu (č. 1) nutné pro ovládání celého program Matlab. V navigačním průzkumníkovi vlevo (č. 2) je možné procházet adresáře a otevírat jednotlivé soubory. V části č. 3 je Edit určený pro psaní kódu. Poslední část Command Window (č. 4) slouží pro spouštění programů, zadávání příkazů a možný tisk výsledků ze simulace.



Obrázek č. 18: Popis programového prostředí Matlab

5.4 Simulace Matlab

Pro vykreslení vstupního Gaussovského profilu záření (Obrázek č. 19) do jádra MMF byly použity vlastnosti jádra včetně jeho rozměrů totožné s těmi uvedenými v kapitole 6.2.



Obrázek č. 19: Vstupní profil záření do MMF Matlab – d_core 100 µm, wavelength 1550 nm

Ze znázornění optického vlákna vidíme, že záření vstupující do jádra je navázáno pouze do jádra vlákna, nikoliv i jeho pláště. Je to dáno především velkým průměrem vlákna (100µm) a vlnovou délkou (1550 nm) [31]. Tato simulace vstupního profilu záření

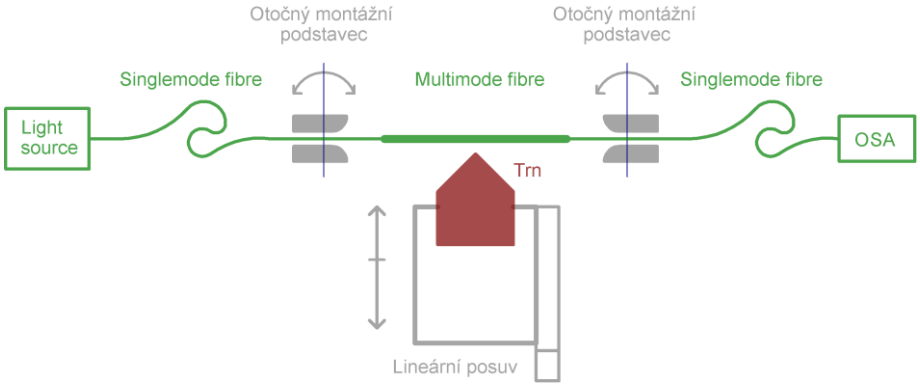
do OPV dokazuje, že pro dané parametry vlákna a zdroje světla se veškeré záření bude propagovat pouze jádrem vlákna, nikoliv pláštěm.

6 NÁVRH A PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Po prostudování potřebné teorie o problematice jsem přistoupil k vytvoření experimentálního měření. Pro experimentální měření neelektrické veličiny jsem se rozhodoval mezi třemi veličinami – ohyb, teplota a mechanické napětí. Po prostudování odborných článků a konzultací s pracovníky fakulty zabývající se optickými snímači a vlákny jsem došel k těmto závěrům: měření teploty pomocí SMS struktur je sice citlivé, ale tvorba experimentu se ukázala být stěžejní a časově náročná. Podobně tomu bylo u měření mechanického napětí. V laboratorních podmínkách se ukázalo jako nejvhodnější měřit neelektrickou veličinu ohyb.

Když byla vybrána měřená neelektrická veličina, bylo nutné promyslet návrh experimentu. Optické vlákno bylo nutné na obou stranách vlákna, tedy za singlemode část pevně uchytit tak, aby nedocházelo k prokluzu a zkreslení výsledků měření (Obrázek č. 20). Obecně lze pro ohyb použít jakoukoliv hranu. Zaoblené nebo tupé hrany jsou kvůli nebodovému ohybu v tomto případě nežádoucí. Já jsem pro tento účel navrhl trn (Obrázek č. 25) s úhlem styčné hrany s vláknem 90°. Kvůli nemožnosti navštěvovat laboratoř danou okolností mnou nezaviněnou (Covid-19) jsem trn jako jediný díl nestihl vytisknout na 3D tiskárně. Trn měl být umístěn na lineární posuv s krokovým motorem značky Standa [22] (Obrázek č. 20) a prostřední multimode část měla být mechanicky ohýbána. Ovšem při pevně uchycených okrajových částech vlákna a ohybu jeho středové části dochází zároveň i mechanickému napětí vlákna. To se nemůže zanedbat a při daném experimentálním uspořádání se od něj ani oprostit. Výsledkem měření je tedy kumulativní efekt ohybu a mechanického napětí. Jelikož mi ale šlo primárně o vývoj metody, jak ze spektra zjistit požadovanou měřenou fyzikální veličinu, pro zjednodušení se nebudu snažit získat informaci o mech. napětí i ohybu zároveň, ale postačí informace o tom, jak moc se vlákno ohnulo. Úplného odstranění mech. napětí by se sice dalo docílit přidáním dalších dvou lineárních posuvů, ale značně by se tím zkomplikovala mechanická část experimentu. Softwarové vybavení s tímto rozšířením experimentu počítá a už je pro něj předpřipraveno, kdy nastavení dvou pomocných lineárních posuvů je přepočteno pomocí lineární rovnice na základě požadované polohy hlavního – ohýbacího posuvu (Obrázek č. 20).

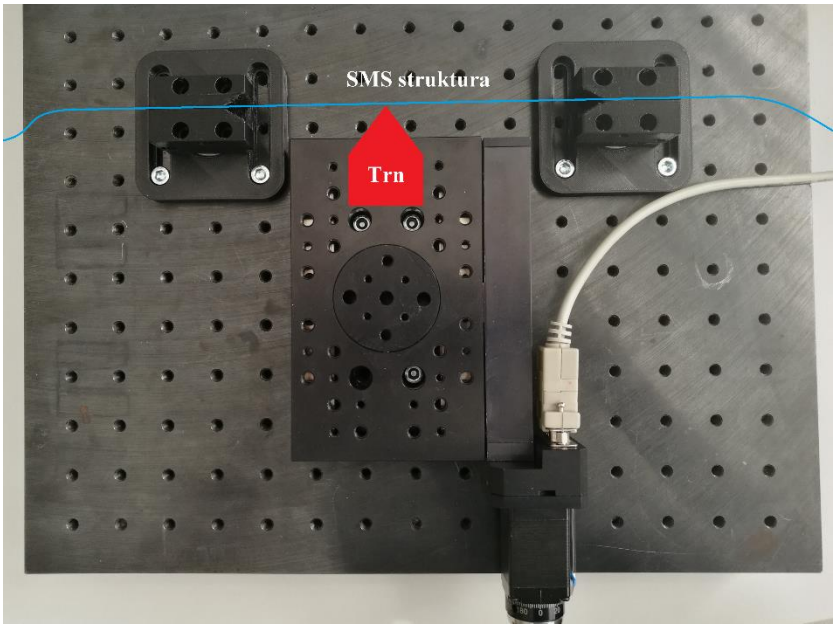
Jako kontinuální zdroj záření bylo použité bílé světlo, které má široké vyzařovací pásmo. Ke zdroji byla připojena SMS struktura, na které se bude provádět ohyb v multimode části (Obrázek č. 20). Z druhé strany SMS struktury byl připojen optický spektrální analyzátor (anglicky Optical Spectrum Analyzer, zkr. OSA) model 771 značky Bristol Instruments [23]. Tento OSA byl použit z důvodu jeho dostupnosti v laboratořích, snadné komunikaci s PC a vyhovujícím parametrům jako jsou snímané rozsahy a šířka spektra.



Obrázek č. 20: Schéma experimentu

6.1 Mechanická část

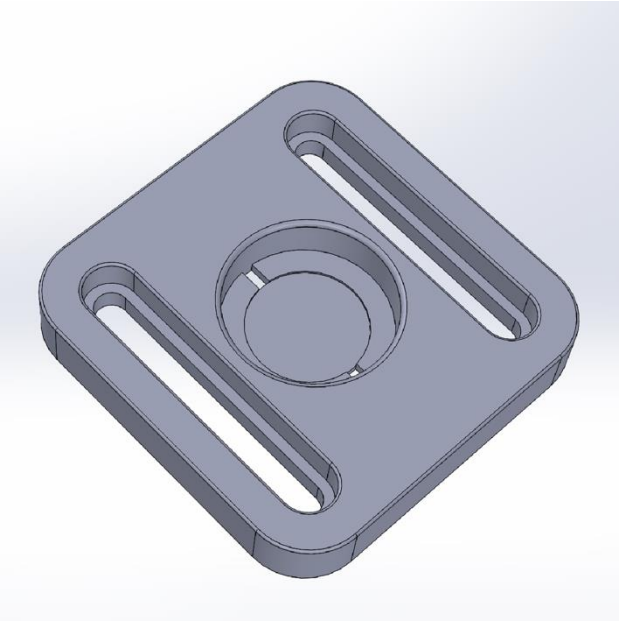
Celý experiment byl konstruován na univerzální laboratorní podložce s montážními otvory. Pro uchycení OPV byl zkonstruován montážní podstavec s čelistí, v které bylo OPV uloženo. Uchycení OPV do čelistí by mohlo zapříčinit nežádoucí ohyb OPV kolem hrany čelistí a nežádoucí útlum záření v něm. Proto byly obě čelisti zabudovány do ložisek, mohly se tak volně otáčet a tyto útlumy nevznikaly. Navíc pro možnou variabilitu experimentu se montážní čelisti konstruovaly jako odnímatelná. Z těchto důvodu se celý montážní podstavec skládá ze tří jednotlivých dílů (Obrázek č. 22 - 24). Tyto díly byly nakresleny v programovém prostředí SolidWorks [24] a vytištěny z materiálu PETG na fakultní 3D tiskárně značky Průša [25]. Výkresy mechanických částí jsou přiloženy v příloze této práce.



Obrázek č. 21: Experimentální část v laboratoři

6.1.1 Spodní díl

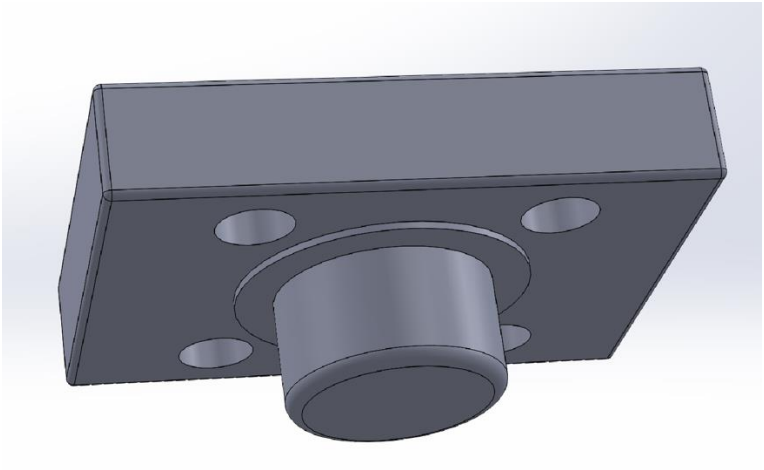
Spodní díl podstavce (Obrázek č. 22), má po stranách dva oblé otvory pro možnost plynulého nastavení polohy a uchycení do laboratorní podložky. Uprostřed dílu je otvor určený pro vtlačení ložiska. Z druhé strany na ložisku bude umístěn horní díl. Na dně otvoru pro ložisko je odsazení, které brání kontaktu vnitřní otočné části ložiska se dnem. Případný kontakt by znemožňoval zcela volné otáčení ložiska a mohl ovlivnit výsledek měření. Kromě toho byly na dně otvoru pro ložisko vytvořeny dvě díry určené pro odstranění ložiska pomocí nástroje.



Obrázek č. 22: Mechanická část – spodní díl

6.1.2 Horní díl

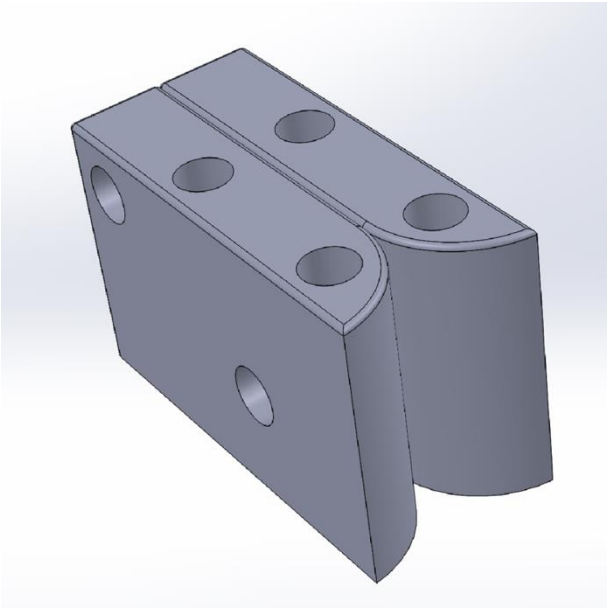
Na zmíněném ložisku z předešlé kapitoly byl usazen horní díl (Obrázek č. 23). Ten slouží jako univerzální platforma pro různé typy čelistí. Pro výměnu čelistí tak stačí vytisknout pouze montážní čelisti bez horního dílu. Tím se ušetří náklady na materiál pro 3D tisk a zvýší se modifikovatelnost experimentu.



Obrázek č. 23: Mechanická část – horní díl

6.1.3 Montážní čelisti

Do horního dílu se přišroubuje montážní čelist (Obrázek č. 24). Ta se skládá ze dvou protikusů, které po sešroubování drží OPV. Jelikož je OPV velmi tenké a mohlo by dojít k prokluzu OPV mezi čelistmi, na čelisti se přilepí oboustranná lepicí páska, která tomu zamezí. Okraje čelistí blíže k multimódové části jsou zaobleny s větším poloměrem než jiné, aby opět nedocházelo k nežádoucímu ohybu singlemode vlákna a útlumu záření v místě ohybu.

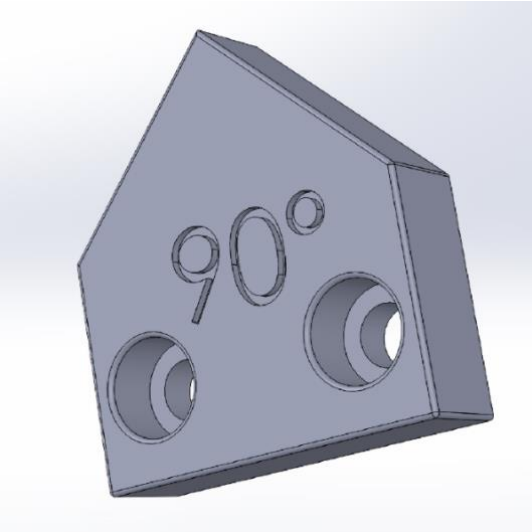


Obrázek č. 24: Mechanická část – montážní čelisti

6.1.4 Trn

Multimódová část nataženého a uchyceného vlákna v montážních čelistech měla být ohýbána trnem (Obrázek č. 25). Ten se přimontuje k hlavnímu lineárnímu posuvu. Styčná

hrana trnu byla o úhlu 90°. Uvažoval jsem i o odzkoušení měření s jinými úhly trnů. Kvůli nemožnosti navštěvovat laboratoř danou okolností mnou nezaviněnou (Covid-19) jsem trn jako jediný díl nestihl vytisknout na 3D tiskárně a uvažuji tak pouze s navrženým modelem.



Obrázek č. 25: Mechanická část – trn

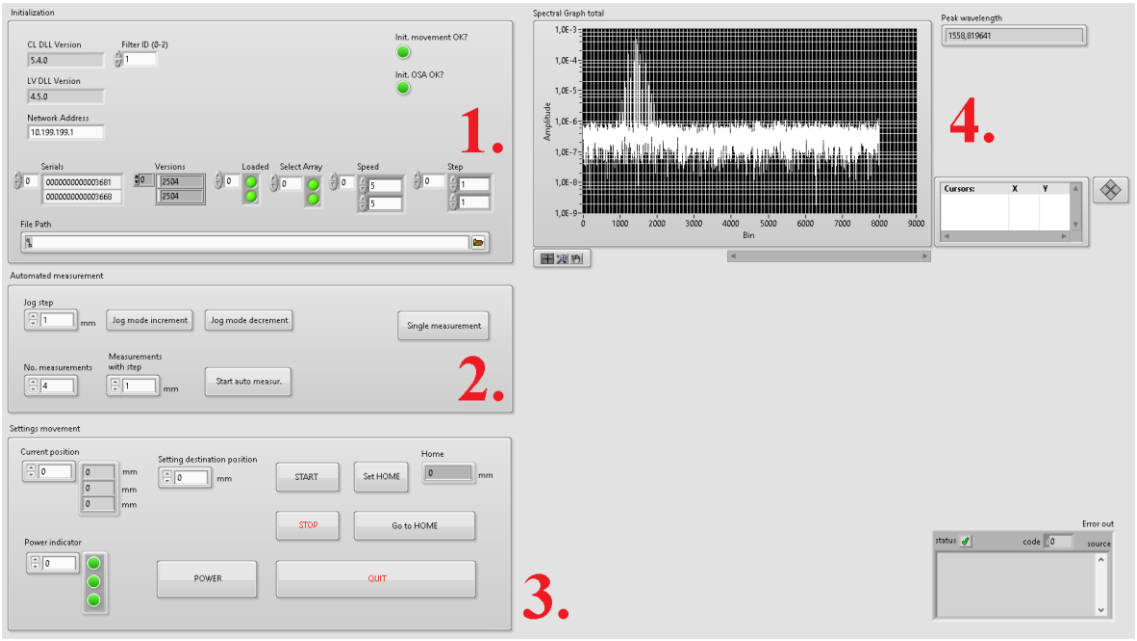
7 SOFTWAROVÁ ČÁST

Cílem bylo navrhnout obslužný program pro dosažení co nejlepší přesnosti (nastavení posuvů), rychlosti a především opakovatelnosti měření. Podstatná část uživatelské manipulace s posuvem a OSA je tak nahrazena tímto programem.

Program pro experiment byl vytvořen v grafickém programovém prostředí LabVIEW 2015. Program komunikuje s motorovými drivery (8SMC1-USB) pro krokové motory lineárního posuvu, a také se spektrálním analyzátorem, ze kterého vyčítá změřené spektrum.

7.1 Popis uživatelského prostředí programu – front panel

Uživatelské prostředí (front panel) bylo rozděleno do několika hlavních částí – inicializační (část č. 1), automatizované měření (část č. 2), nastavení posuvů (část č. 3) a zobrazení spektra (část č. 4) (Obrázek č. 26).



Obrázek č. 26: Program LabVIEW – front panel aplikace

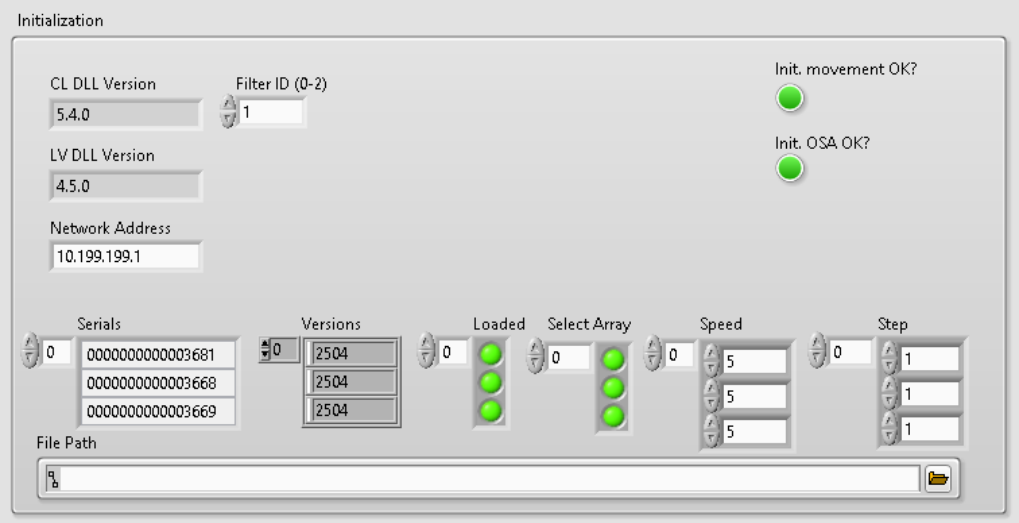
7.1.1 Inicializace a nastavení programu

Po spuštění programu dojde k inicializaci a navázání komunikace s driverem a OSA. Program vyčte verzi knihovny DLL ve formátu x.y.z, kde parametr „x“ značí majoritní verzi, parametr „y“ minoritní verzi a parametr „z“ verzi zveřejnění knihovny DLL. Parametr „Filter ID“ je rozsah spektra, v jakém bude OSA měřit. Komunikace mezi OSA a PC je možná buď síťovým patch kabelem, nebo po sběrnici USB, která byla použita pro tento projekt. Nastavení „Network address“ potom pro USB komunikaci musí být 10.199.199.1 na portu 23. V případě použití patch kabelu je třeba zkontrolovat, aby

nastavená IP adresa nebyla kolizní s jinou už použitou adresou. Všechny tyto hodnoty jsou již přednastaveny (Obrázek č. 26 část 1: Inicialization nebo detailní pohled Obrázek č. 27).

Úspěšnou inicializaci driveru a OSA zjistíme pomocí indikačních LED na front panelu programu. Pokud proběhla inicializace driveru správně, zobrazí se v poli „*Serials*“ jejich označení a podle potřeby vybereme libovolný driver v poli „*Select Array*“, s kterým chceme pracovat. Zbylé drivery zůstanou neaktivní. Dále se nastaví „*Speed*“ parametr pro zvolení rychlosti a „*Step*“ parametr pro zvolení velikost kroku motoru.

Nakonec se do „*File Path*“ zvolí cesta cílového adresáře, kam se budou ukládat změřená data. To lze buď vložením cesty přímo do zadávacího pole, nebo kliknutím na ikonu obálky se otevře formulářové okno a cestu můžeme vybrat zde.



Obrázek č. 27: Inicializace programu – front panel aplikace

7.1.2 Jog mode a automatizované měření

Program byl vytvořen přesně na požadavky tohoto měření. Proto obsahuje funkci jog mode a automatizované měření. Jog mode byl použit pro vícenásobné pojíždění posuvu o konstantní krok. Do pole „*Jog step*“ se zadá velikost jednoho kroku v milimetrech. Následně stiskem tlačítek „*Jog mode increment*“ nebo „*Jog mode decrement*“ se pojíždí hlavním posuvem směrem vpřed nebo vzad (Obrázek č. 26 část 2: Automated measurement nebo detailní pohled Obrázek č. 28).

Po jemném dotyku trnu s optickým vláknem (nesmí dojít k jeho ohybu – spektrum zůstává beze změny) je přípravek připraven k měření. Tento okamžik je také vhodný pro uložení nové polohy posuvu stiskem tlačítka „*Set Home*“, podrobněji popsaném v kapitole 7.1.3.

K měření můžeme použít přichystanou funkci automatizovaného měření. Ta umožňuje zadat po pole „*No. measurements*“ počet měření, které chceme provést a do vedlejšího zadávacího pole „*Measurements with step*“ velikost kroku v milimetrech mezi

jednotlivými měřeními. Proces automatizovaného měření se spustí stiskem tlačítka „*Start auto measur*.“, kdy se hlavní posuv bude pohybovat od aktuální polohy směrem vpřed. Získaná spektra budou uložena do zadaného adresáře (viz kapitola 7.1.1). Název uložených souborů je ve formátu:

SMS measurement_*datum_čas_aktuálníPozice* mm.tdms.

Další možností je jednotlivé uložení spektra pouze z aktuální polohy. K tomu slouží tlačítko „*Single measurement*“. Spektrum bude uloženo stejným způsobem a názvem souboru jako u automatizovaného měření.

Obrázek č. 28: Jog mode a automatizované měření – detailní pohled

7.1.3 Nastavení posuvů

Experiment nedisponuje zařízením na měření skutečné polohy posuvu. Veškeré údaje o poloze tak získáváme pouze z driveru krokového motoru. Ten po spuštění a inicializaci programu považuje aktuální polohu posuvu jako výchozí – nulovou.

Aktuální polohu posuvů zjistíme z pole „*Current position*“. V programu můžeme číselně zadávat požadovanou polohu posuvu ručně do zadávacího pole „*Settings destination position*“ v milimetrech. Akci potvrdíme stiskem tlačítka „*START*“. To automaticky zapne všechny krokové motory a hlavní posuv s trnem se přesune na požadovanou polohu. Další možností je před stiskem „*START*“ zapnout ručně krokové motory tlačítkem „*POWER*“. Zelené LED „*Power indicator*“ na front panelu značí zapnutí nebo vypnutí motorů. Vypnutými krokovými motory pak lze volně mechanicky otáčet, což umožňuje například jemné ruční změny posuvu. Jak již bylo zmíněno v kapitole 7.1, hodnoty pomocných posuvů se přepočtou z lineární rovnice na základě hlavního posuvu.

Během pohybu posuvu lze kdykoliv stisknout tlačítko „*STOP*“, které okamžitě zastaví pohyb všech motorů.

Pro rychlejší a snadnější měření byla v uživatelském rozhraní vytvořena funkce *Home*. Ať už bude posuv v jakékoliv poloze, stiskem tlačítka „*Go to Home*“ se vždy automaticky vrátí zpět na domovskou hodnotu. Ta je zobrazena v „*Home*“ indikátoru. Po spuštění programu je tato domovská hodnota nulová. Přenastavit ji lze snadno stiskem tlačítka „*Set Home*“. Program použije aktuální polohu hlavního posuvu, uloží si ji jako

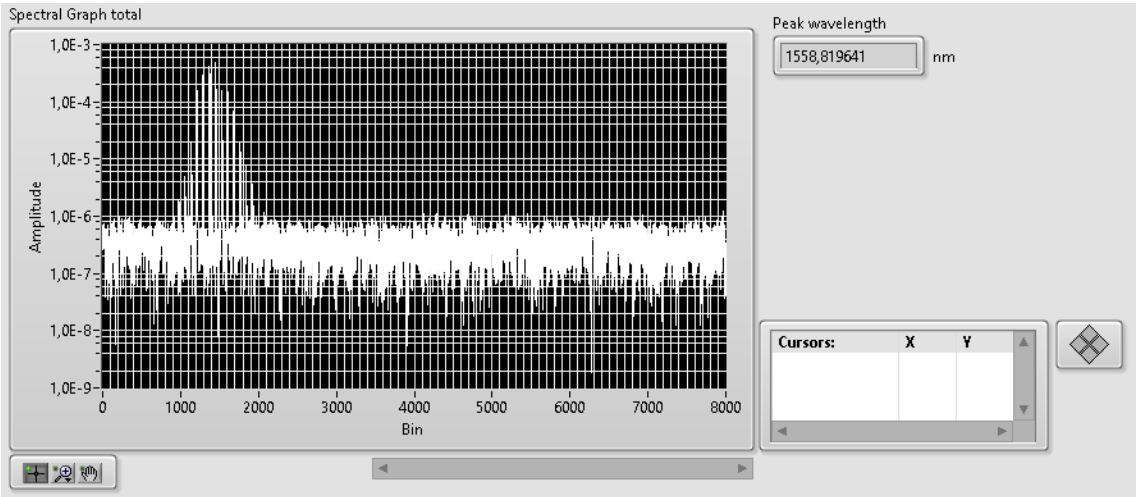
novou domovskou hodnotu a opět zobrazí v indikátoru „*Home*“. Využití *home* funkce je dobré například mezi měřeními, pro rychlý přesun posuvu do polohy, kdy se trn hlavního posuvu lehce dotýká optického vlákna, ale neohýbá jej.

Tlačítko „*QUIT*“ korektně ukončí komunikaci ve všemi zařízeními a ukončí i celý program (Obrázek č. 26 část č. 3 nebo detailní pohled Obrázek č. 29).

Obrázek č. 29: Nastavení posuvu – detailní pohled

7.1.4 Zobrazení spektra

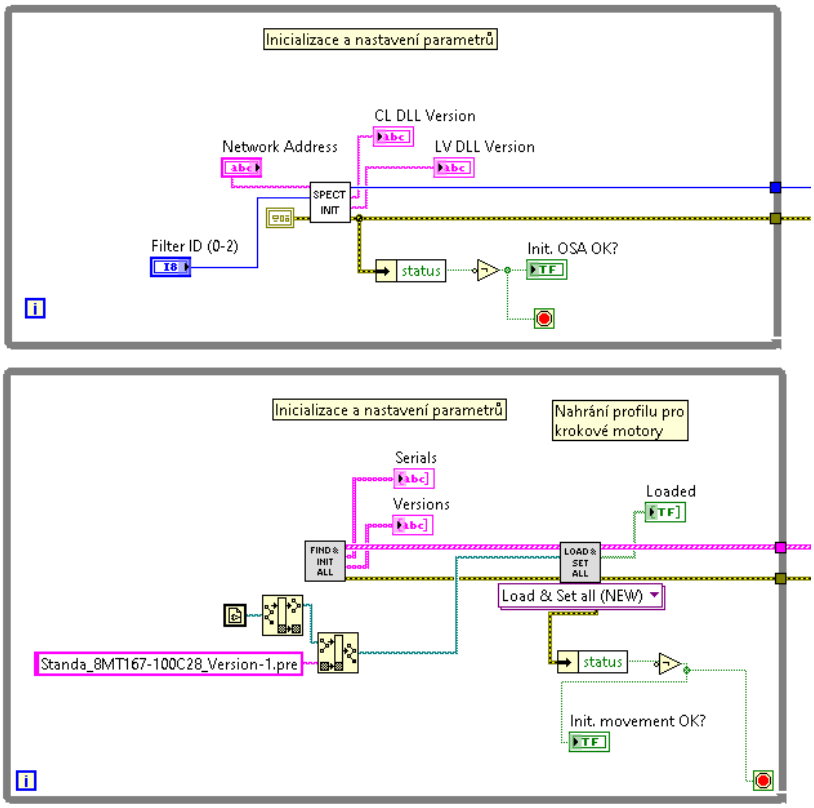
Program neustále vyčítá spektrum z OSA a zobrazuje na front panelu. Indikátor „*Peak wavelength*“ zobrazuje numerickou hodnotu změřené dominantní vlnové délky ze spektra v nanometrech (Obrázek č. 26 část č. 4 nebo detailnější pohled Obrázek č. 30). Graf disponuje také možností přidání kurzorů. Díky nim lze přesně určit hodnotu ze spektra v místě kurzoru. Zobrazení grafu je v Bin, kde požadovaná šířka spektra 100 nm odpovídá 6786 Binů. Spektrum z OSA je vyčítáno s periodou 1 sekunda.



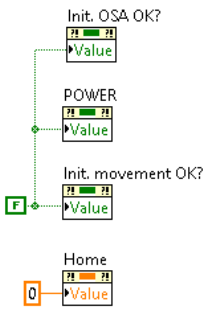
Obrázek č. 30: Zobrazení spektra

7.2 Popis programu – block diagram

Program funguje na bázi *Queue Handler Message* (QHM), což je předávání zpráv v „*Message cluster*“ mezi strukturami pomocí fronty. Po spuštění programu se jako první otevírá komunikace s drivery motorů a OSA. Pokus o navázání komunikace se opakuje do té doby, než je úspěšně navázána (Obrázek č. 31). Poté se provádí první nastavení parametrů těchto zařízení. Mimo jiné se při inicializaci nastaví parametry na výchozí hodnoty (Obrázek č. 32). K ovládání driverů pro krokové motory Standa byly použity již k tomu vytvořené SubVI od Marka Maralíka [26].



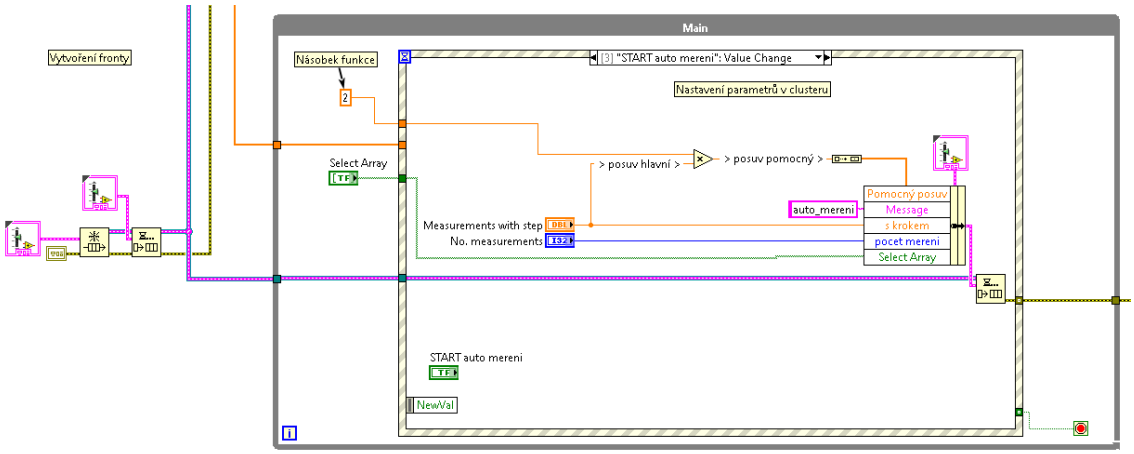
Obrázek č. 31: Inicializace – block diagram



Obrázek č. 32: Nastavení výchozích parametrů

Po spuštění se deklaruje fronta a hned na to je program plně připraven k používání a čeká na událost od uživatele.

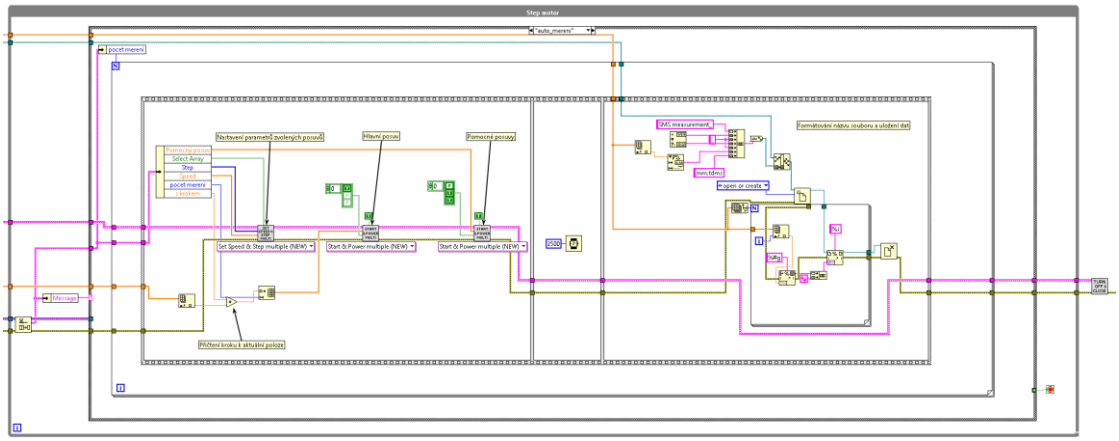
Jádrem celého programu je „*Main*“ cyklus typu *while* s event structure (Obrázek č. 33). Tato struktura reaguje na veškeré uživatelské akce z front panelu. Podle zadání uživatele upravuje obsah clusteru, který následně přes frontu distribuuje ostatním částem programu.



Obrázek č. 33: QHM a Main struktura

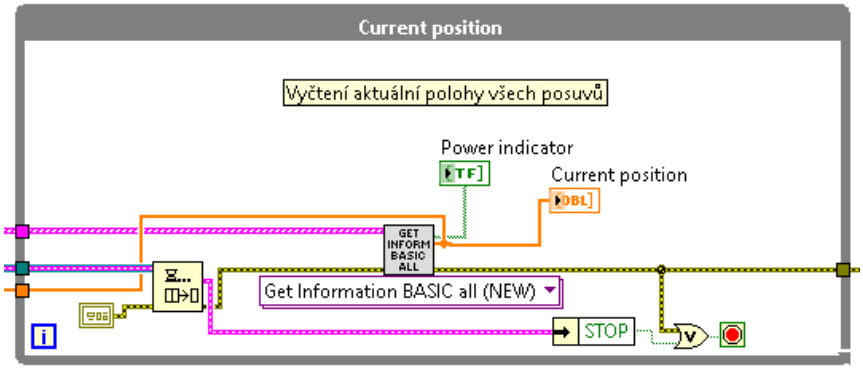
Jedna z hlavních částí programu je „*Step motor*“ struktura. Ta získá cluster s daty z fronty (Obrázek č. 34). Na tomto obrázku je detailně vidět naprogramování automatizovaného měření podrobně popsaného v kapitole 7.1.2. Podle parametru „*Message*“ z clusteru je aktivován příslušný *Case*. Ten obsahuje *For* cyklus, který se provádí podle počtu zadaných měření „*No. Measurements*“ z front panelu. *Flat Sequence Structure* ve *For* cyklu je rozdělena na tři části. V první části se provádí posuv lineárních posunů. Hlavní posuv vykoná krok mezi měřeními zadaným uživatelem do „*Measurements with step*“. Poloha pomocných lineárních posuvů je přepočteno pomocí lineární rovnice na základě požadované polohy hlavního posuvu. Ta byla vzorově naprogramována dle rovnice (11) a případně se dá programově změnit. V druhé části je časová prodleva 2,5 sekundy, aby se stačil posuv dostat na požadovanou polohu a obnovilo se měření z OSA. V třetí části se naměřená data uloží do datového souboru a cyklus se opakuje.

$$posuv_{pomocný} = 2 \times posuv_{hlavní} \quad [\text{mm}] \qquad (11)$$



Obrázek č. 34: Step motor – automatizované měření

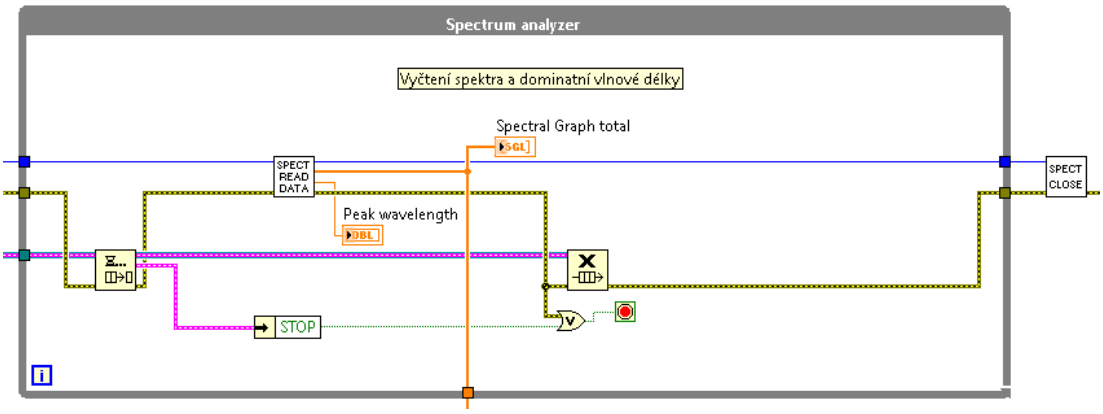
Nezávisle na ostatních se v odděleném cyklu typu *while* neustále vyčítá aktuální polohu posuvů „*Current position*“ a zapnutí/vypnutí krokových motorů „*Power indicator*“ (Obrázek č. 35).



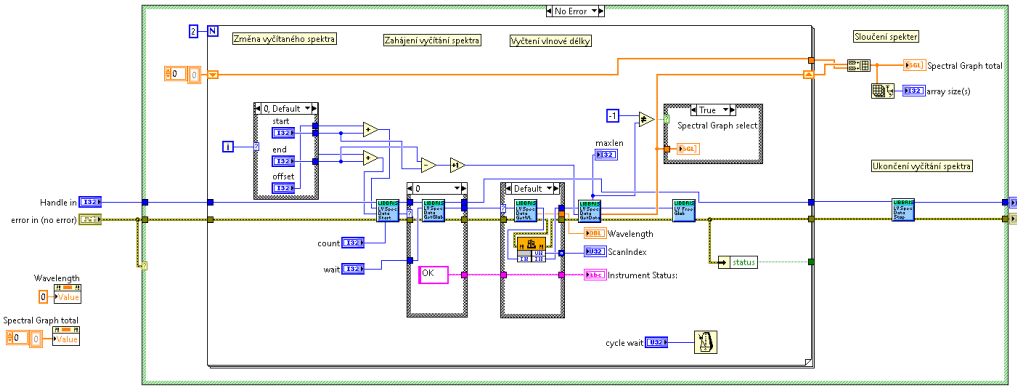
Obrázek č. 35: Aktuální poloha posuvů

Další odděleným cyklem typu *while* je „*Spectrum analyzer*“ (Obrázek č. 36). Ten neustále vyčítá změřená data ze SubVI „*Spect read data*“, zobrazuje dominantní vlnovou délku a spektrum do grafu na front panelu.

SubVI „*Spect read data*“ vychází ze vzorového Sample.vi [23] od výrobce OSA. Původní program od výrobce měl jen jednu pevně danou šířkou vyčítaného spektra. Pro monitorování ohybu SMS struktury byla potřebná zhruba dvojnásobná šířka spektra (100 nm). Program byl proto doplněn o *For* cyklus o dvou krocích, kdy každý krok vyčítá jiný spektrální rozsah. Rozsahy na sebe navazují a po jejich vyčtení jsou sloučeny do jednoho výsledného spektra (Obrázek č. 37).



Obrázek č. 36: Vyčítání dat z OSA



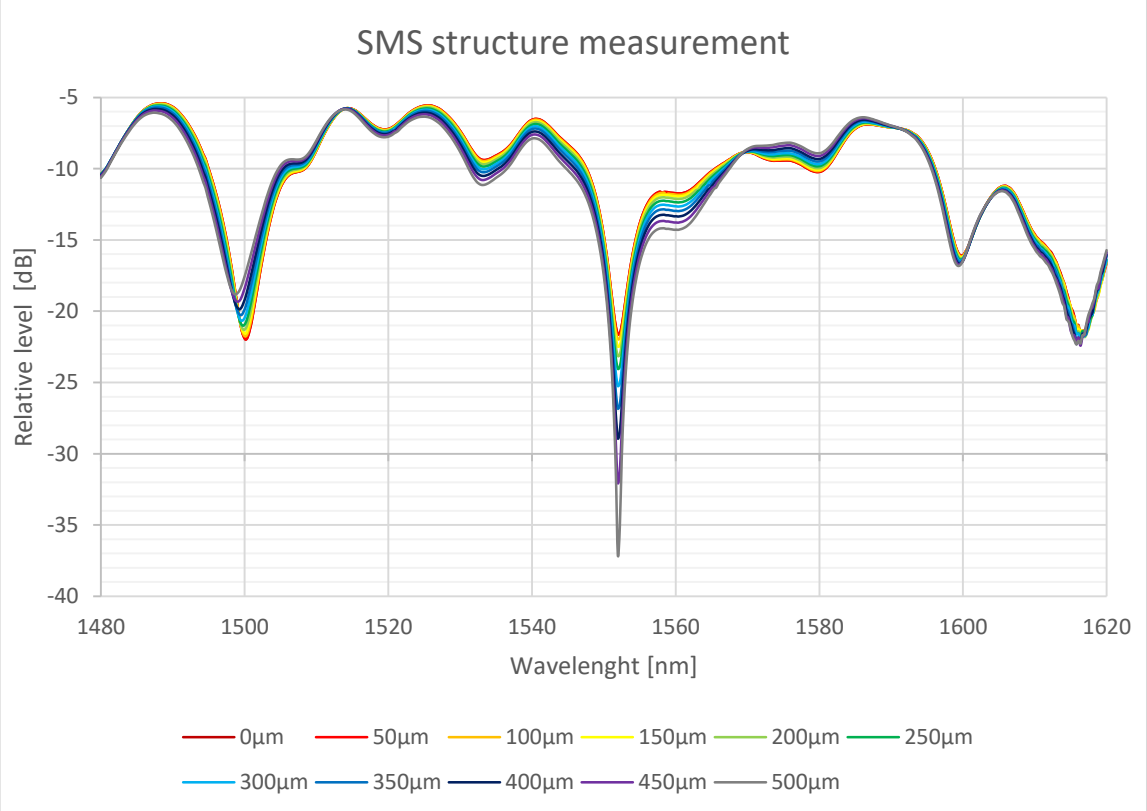
Obrázek č. 37: SubVI – Spect read data

8 VYHODNOCENÍ ZADANÝCH DAT

Původně měla být data změřena vypracovaným obslužným programem zmíněným v minulé kapitole. Nepřízní osudu mi byla uzavřena laboratoř a později i celá škola z důvodu virové pandemie Covid-19 a na změření dat v domácím prostředí jsem nebyl vybaven. Proto byla provedena nutná změna zadání práce a data nebyla změřena, ale zadána [32].

Zadaná data byla tvořena tabulkou naměřených dat (v příloze DATAx.xlsx) z SMS struktury. Pro každou vlnovou délku z měřeného spektra byl uveden jeden útlum pro jeden ohyb. Cílem bylo navrhnout vyhodnocovací systém, který by na základě nově změřeného (spektra) dokázal určit, o jak velký ohyb vlákna se jedná. Zadaná data jsem nejprve předzpracoval metodou Principal Component Analysis (zkr. PCA). Tato metoda slouží ke snížení dimenze nejméně významných vstupních dat. Nejprve určí významné rysy zadaného spektra a seřadí je od nejvýznamnějšího po nejméně významný rys (dle „*score*“ koeficientu). Redukce nejméně významných rysů zmenší dimenzi při co nejmenším ovlivnění trendu dat. Poté jsem na těchto datech provedl učení umělé neuronové sítě (zkr. UNS), která se stará o samotné vyhodnocení ohybu ze spektra.

Vzdálenost mezi montážními body je 166 mm, délka upevněného vlákna mezi čelistmi je 20 mm na každé straně. SMS Struktura byla ohýbána ve středové části pomocí pravoúhlého trnu. Průměr jádra MM: 105 µm, délka MM: 44,38 mm, NA: 0.22.

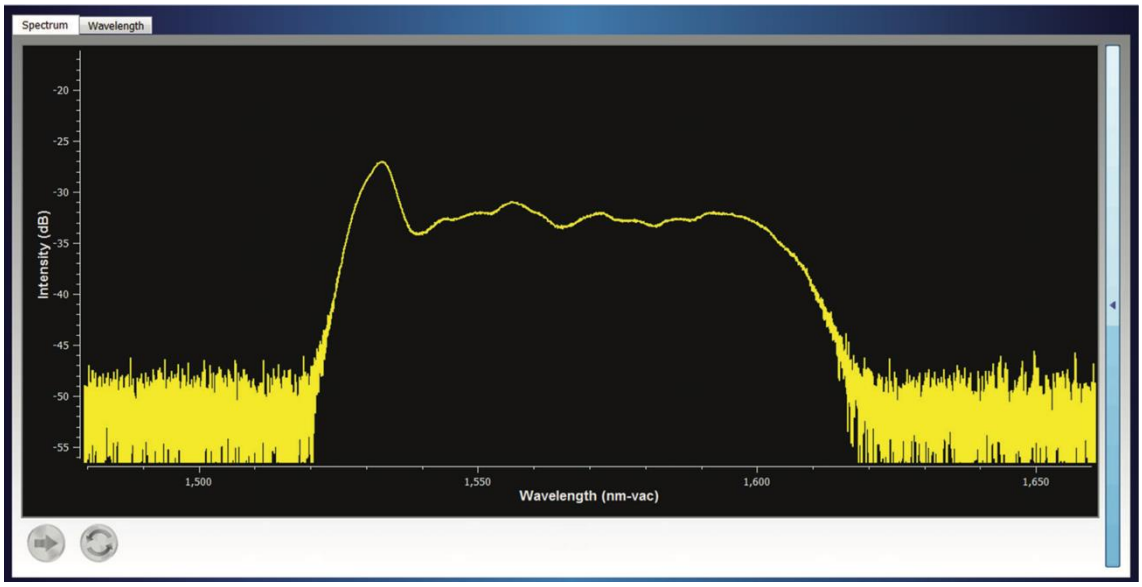


Obrázek č. 38: Ukázka zadaných testovacích dat SMS struktury [32]

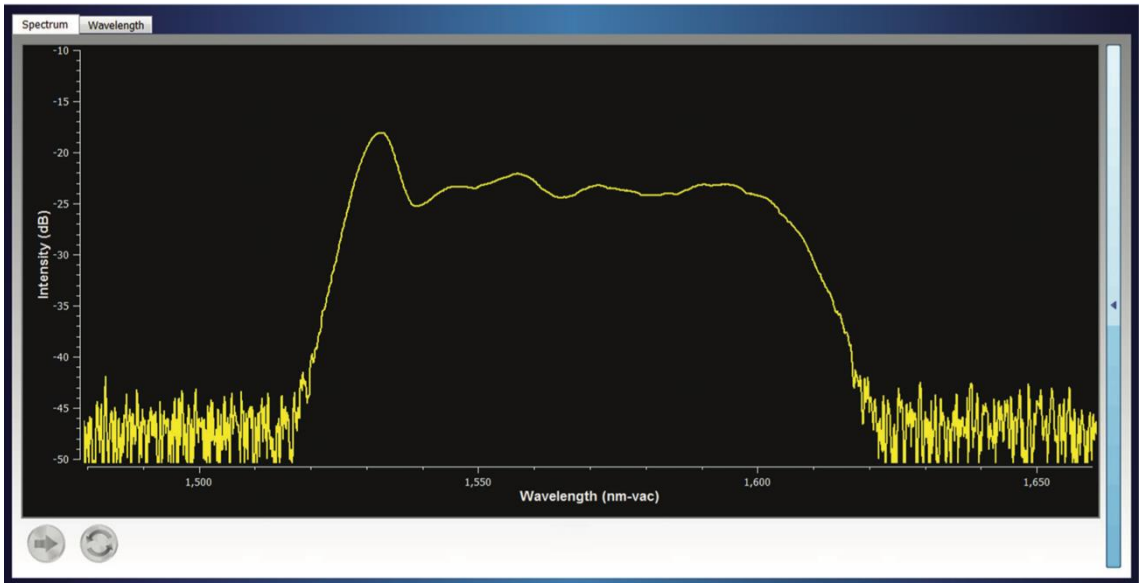
8.1 Realizace metody pro vyhodnocení dané fyzikální veličiny

Metodou PCA jsem zredukoval vstupní data set, který byl původně o velikosti dimenze 501 na velikost 100. Redukci dat jsem provedl proto, abych odstranil zbytná data a učení UNS se díky tomu stalo rychlejší a vyžadovalo méně výpočetního výkonu. K učení jsem použil program Matlab [21] s toolboxem Neural Network Toolbox 9.1 [27], Neural Fitting.

Zadaná data byla seřazena dle velikosti ohybu vlákna a vlnové délky. Působením trnu na střed vlákna (Obrázek č. 20) dojde k výchylce v rozsahu 0–500 μm s ekvidistantním krokem 50 μm. Měření spektra bylo realizováno na rozsahu 1480–1620 nm se vzorkovacím krokem 0,28 nm. Od výrobce OSA jsem se dočetl, že míra šumu se pohybuje v měřeném spektru v rozmezí 1-1,3 % [28]. Kvůli malému množství dat, která jsem měl k dispozici a vyšší robustnosti naučené UNS, jsem vstupní data před učením UNS převedl z dB na výkon (W) a zatížil o 1% šum, abych simuloval další zašuměná měření, převedl zpět na dB a použil pro učení. Vstupní dataset do UNS při všech mírách ohybu byl o velikosti $m \times n$, kde m odpovídá různým vlnovým délkám (100 dimenzí) a n velikosti ohybu vlákna (celkem 55 vzorků – 11 vzorků zadaná data bez šumu, zbylé vzorky vygenerované s šumem). Výrobce dále udává, že šum při širokospektrálním měření super luminiscenční diodou je okolo 25 dB pod intenzitním vrcholem (peakem) (Obrázek č. 39). OSA disponuje funkcí „*Broadband Laser Mode*“, umožňující lepší měření spektrálních vlastností širokopásmových optických signálů, kdy při šířce pásma 100 nm je šum až 30 dB pod intenzitním vrcholem [28] (Obrázek č. 40). Při učení jsem použit UNS s vícevrstvou topologií. Vstupní vrstva obsahuje 100 vstupních neuronů, skrytá vrstva 50 neuronů a výstupní vrstva 1 neuron (Obrázek č. 41). Při pokusu zvýšení počtu neuronů ve skryté vrstvě na 70 neuronů a více nedošlo k žádnému zlepšení naučení UNS, pouze bylo učení časově a výpočetně náročné. Snížení počtu neuronů na 30 vedlo sice k rychlejšímu učení UNS, ale vzrostla celková chyba sítě. Pro učení UNS jsem použil poměr 70 % tréninkových dat, 15 % validačních dat a 15 % testovacích dat. Všechny ostatní parametry UNS byly nastaveny automaticky toolboxem.

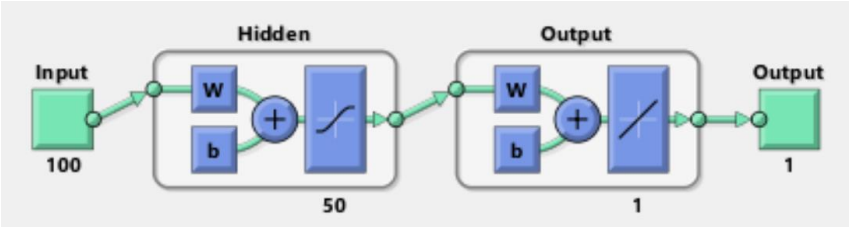


Obrázek č. 39: OSA – Broadband laser mode off [28]



Obrázek č. 40: OSA – Broadband laser mode on [28]

Požadovaný výstupní vektor „*targetValues*“ představuje rozsah ohybů 0–500 µm s krokem 50 µm. TargetValues musí mít stejný počet vzorků jako vstupní, tedy 55 vzorků (11 vzorků zadaná data, 44 vygenerovaná s šumem).

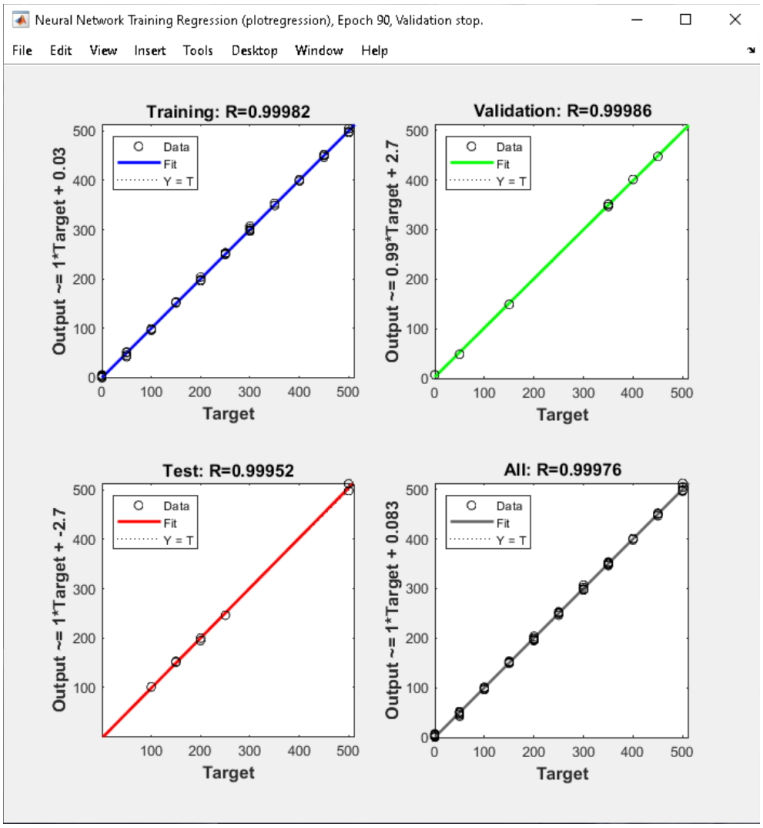


Obrázek č. 41: Topologie umělé neuronové sítě [27]

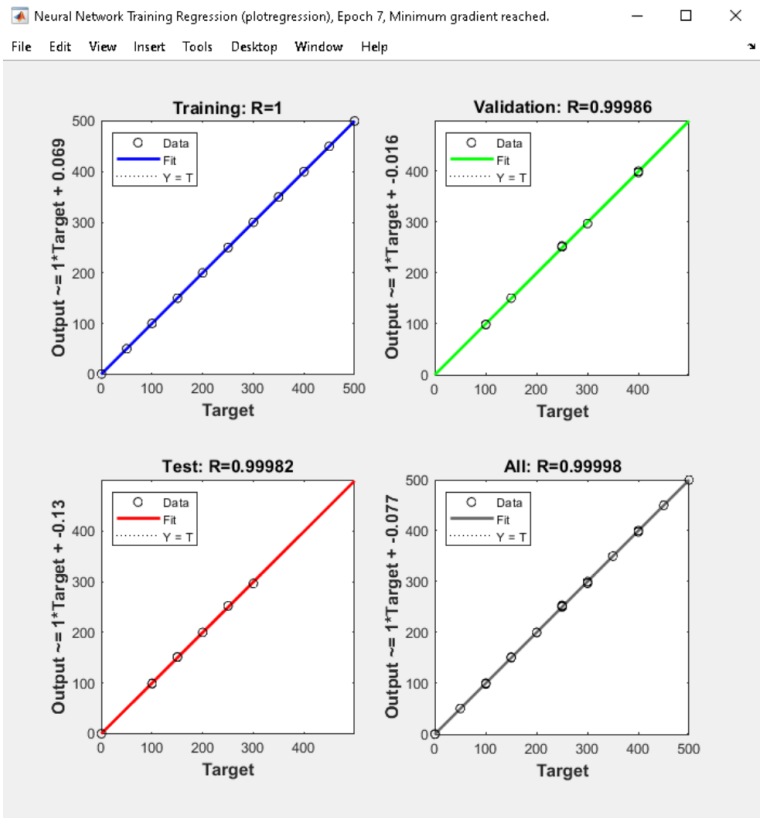
Zmíněný toolbox umožňuje použít mnoho učících algoritmů, ovšem každý se nehodí pro vyhodnocení zadaných dat. Přesto jsem vyzkoušel všechny dostupné algoritmy v toolboxu a díky míře naučení a vyhodnocení se mi jevily jako nejvhodnější pro moje data algoritmy Levenberg-Marquardt (zkr. LM) a Polak-Ribiére Conjugate Gradient (zkr. CGP). Porovnání regresních funkcí, kde je vidět učení, validace a testování algoritmu CGP po 90 epochách (Obrázek č. 42). Oproti tomu regresní funkce algoritmu LM po 7 epochách (Obrázek č. 43). Metoda LM byla sice výpočetně složitější a pomalejší než CGP, ale velmi podobných výsledků dosáhla za podstatně méně epoch.

Regresní hodnota značí korelaci mezi výstupem (output) z UNS a požadovanými (target) hodnotami. Značí se *R* a může nabývat hodnot <0;1>, kdy *R=1* značí silnou korelaci mezi výstupními a požadovanými hodnotami. V opačném případě, tedy *R=0,* je korelace čistě náhodná. Regrese je stanovena při učení (training), validaci (validation), testování (test) a přibližná celková (all) regrese (Obrázek č. 42, 43). Po naučení vygeneroval toolbox Matlab funkci „*myNeuralNetworkFunction.m*“, která obsahuje veškeré naučené parametry UNS - slouží tedy pro vybavení. Vybavovací soubory „*myNeuralNetworkFunction_cgp.m*“ a „*myNeuralNetworkFunction_lm.m*“ jsou v příloze této práce.

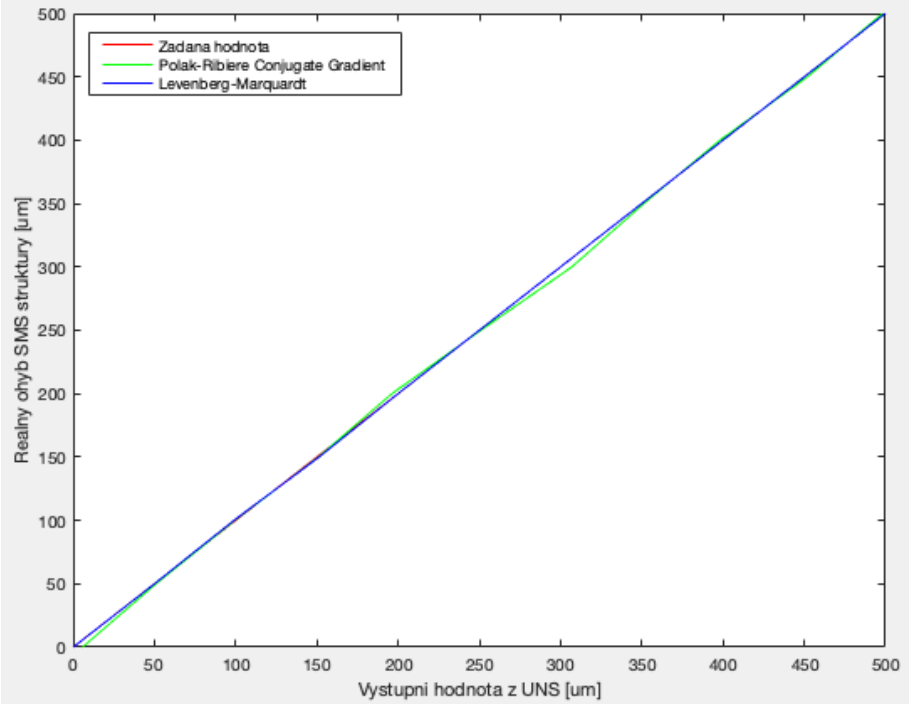
Vybavení UNS probíhá tak, že se této funkci předloží vektor jako vstupní parametr o velikosti 100×1 – což odpovídá jednomu změřenému a předzpracovanému spektru z SMS struktury metodou PCA. Funkce na základě uložených vnitřních parametrů sítě vypočítá výstupní hodnotu ohybu už ve zmíněném rozsahu 0–500 μm. Při grafickém porovnání vybavení se oba algoritmy jeví jako velmi dobré a rozdíl mezi nimi a žádanou hodnotou je minimální (Obrázek č. 44).



Obrázek č. 42: Algoritmus Polak-Ribiére Conjugate



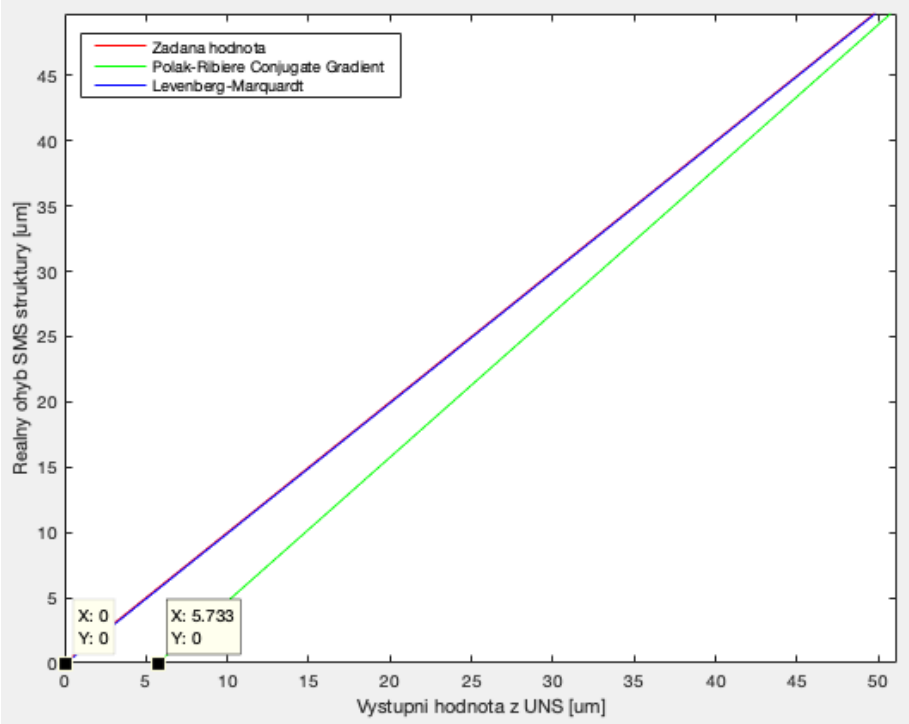
Obrázek č. 43: Algoritmus Levenberg-Marquardt



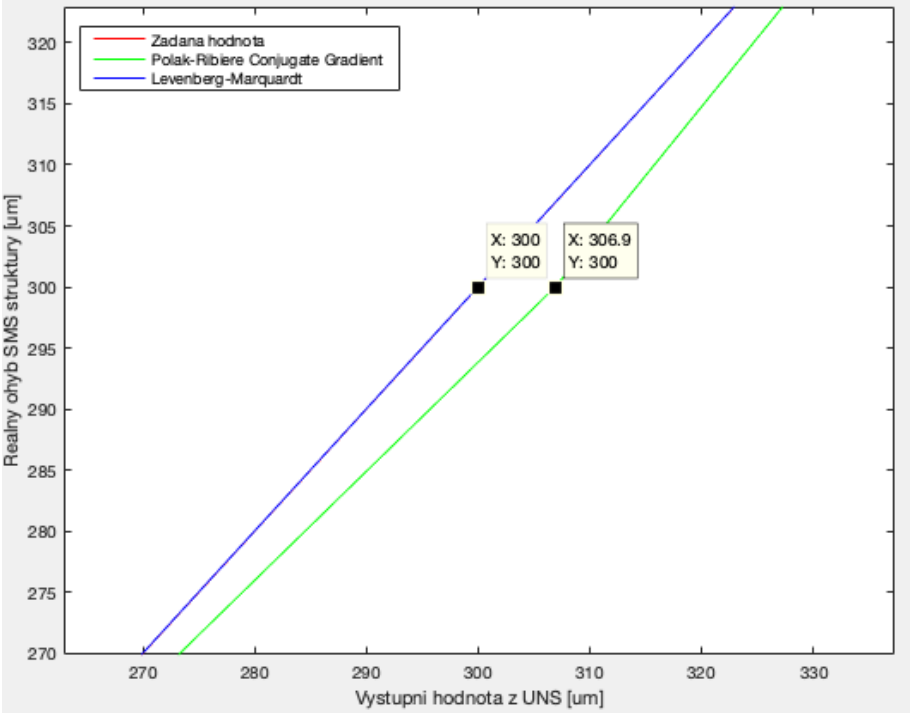
Obrázek č. 44: Porovnání vybavování algoritmů Matlabem

Bližší pohled ale ukazuje, že dochází k mírným odchylkám od žádané hodnoty. Především pak algoritmu Polak-Ribiére Conjugate. U něj byly největší odchylky kolem ohybu 0 a 300 µm (Obrázek č. 45, 46), kde například u reálného ohybu SMS struktury 300 µm na základě spektra vyhodnotila UNS ohyb o velikosti 306,9 µm (Obrázek č. 46). Oproti tomu algoritmus Levenberg-Marquardt téměř dokonale kopíruje žádané hodnoty. Na grafu chyby je zobrazena hodnota odchylky metod od žádané hodnoty pro reálný ohyb SMS struktury (Obrázek č. 47).

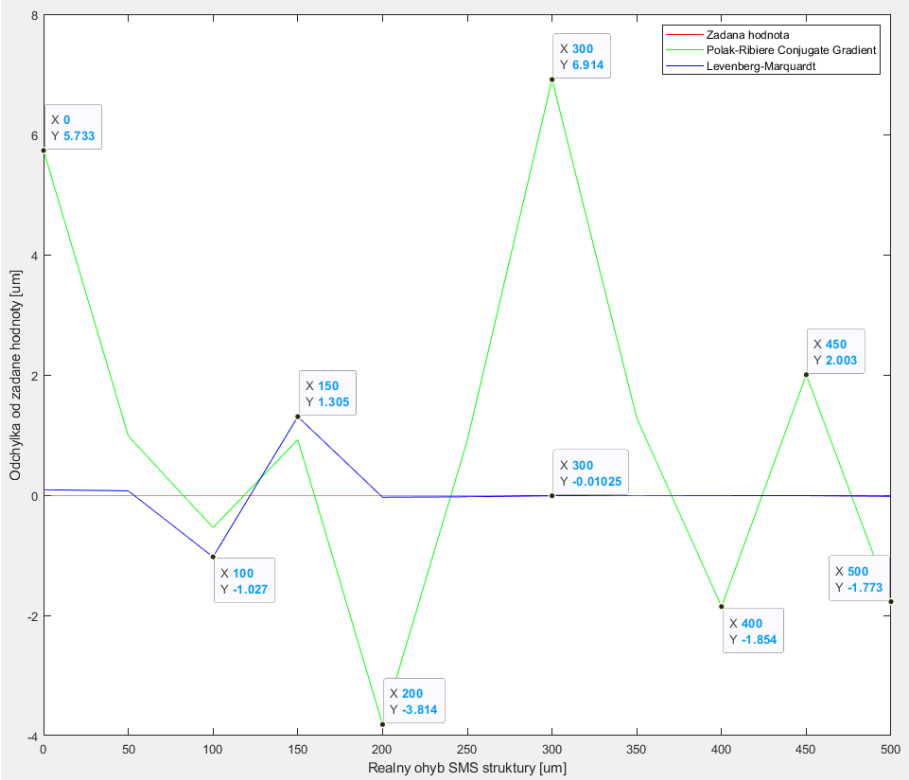
Pro lepší porovnání jsem pro každý algoritmus vypočítal rozdíl algoritmu a žádané hodnoty dle: $\sum_{i=0}^{N}(y_i - d_i)^2$, kde N je počet ohybů, y je výstup z UNS a d je žádaná hodnota, byla celková chyba algoritmu Polak-Ribiére Conjugate Gradient **110.388399** a celková chyba algoritmu Levenberg-Marquardt byla **2.774678**. Na základě toho se dá vyvodit, že algoritmus Levenberg-Marquardt je daleko přesnější a dokáže dobře vyhodnotit reálný ohyb SMS struktury.



Obrázek č. 45: Porovnání vybavování algoritmů – detail kolem 0 µm



Obrázek č. 46: Porovnání vybavování algoritmů – detail kolem 300 µm



Obrázek č. 47: Graf chyby

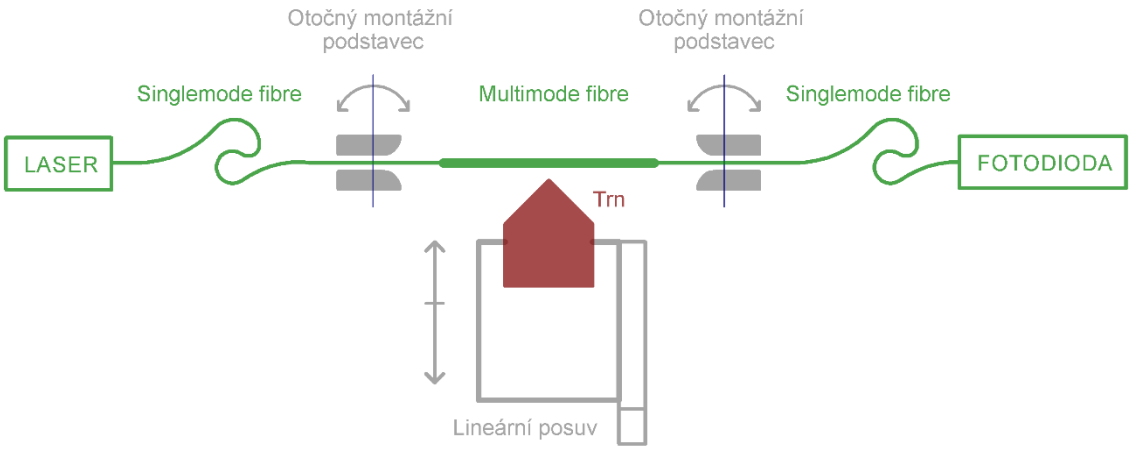
9 VYHODNOCOVACÍ METODY BEZ POUŽITÍ OSA

Při použití OSA jako měřicího zařízení má tu výhodu, že znám celé spektrum signálu (Obrázek č. 38). A právě nutnost použití OSA je i nevýhodou této metody, jelikož jeho pořizovací náklady jsou velmi vysoké (v řádu desetitisíců eur a více). To komplikuje větší rozšíření optovláknových SMS struktur v průmyslových aplikacích. Pro vyhodnocení fyzikálních veličin (tedy kumulativní efekt ohybu a mechanického napětí) lze použít i jiných metod, které nevyžadují znalost celého spektra, ale pouze jeho části.

Vyhodnocení fyzikální veličiny je možné i z vybrané úzkopásmové části spektra. Taková vybraná část by měla mít ideálně na jedné vlnové délce stejný rozestup mezi změřenými spektry při měnící se velikosti ohybu. Zároveň by měly být rozestupy co možná největší. Tím se zvětší měřený rozsah intenzity výstupního signálu SMS struktury, zlepší se přesnost stanovení ohybu a usnadní se také návrh zařízení na vyhodnocení signálu. Jako nejvhodnější se zdají být zdroje světla o vlnových délkách 1500, 1533 nebo 1560 nm. Kvůli rozsahu spektra (1480–1620 nm) musí být zdroj světla na jedné ze zmíněných vlnových délek velmi úzkopásmový (v řádu jednotek nm).

Proto se jeví jako nejlepší způsob vyhodnocení použít laser a fotodiodu pracující na jedné ze zmíněných vlnových délek, s malou šířkou pásma (vysoce koherentní zdroj) a stálostí vlnové délky při změně teploty. Kvůli splnění těchto požadavků jsem vybral laserovou polovodičovou diodu PL-DFB-1560-A1 od výrobce LD-PD INC pracující na vlnové délce 1560 nm ± 0,5 nm (Tabulka č. 1) (Obrázek č. 49). Drift vlnové délky při změně teploty od 10 do 40 °C se pohybuje v rozsahu 1559 až 1562 nm (Obrázek č. 50) [29].

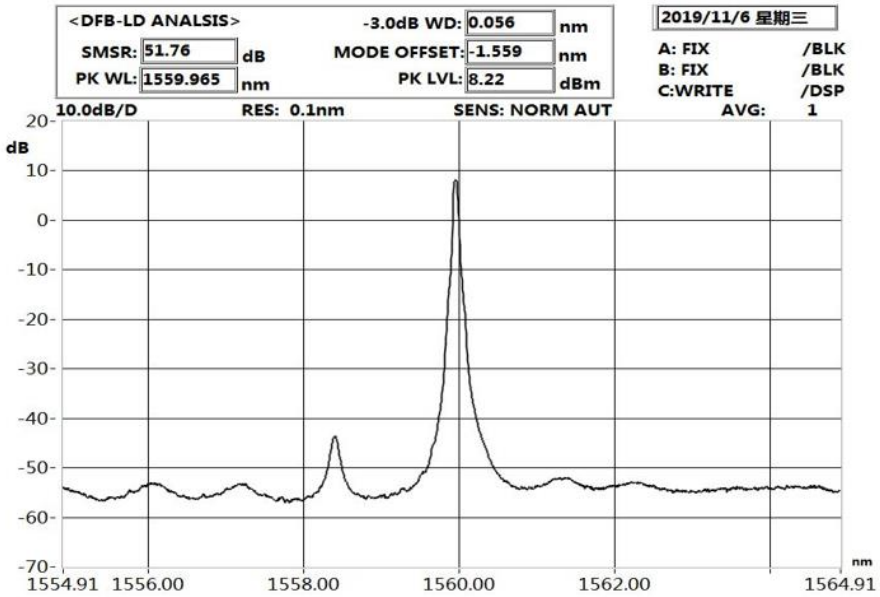
Pracoviště na provádění experimentu tedy zůstává beze změny (Obrázek č. 21), jen je nahrazen zdroj světla a měřicí senzor (Obrázek č. 48).



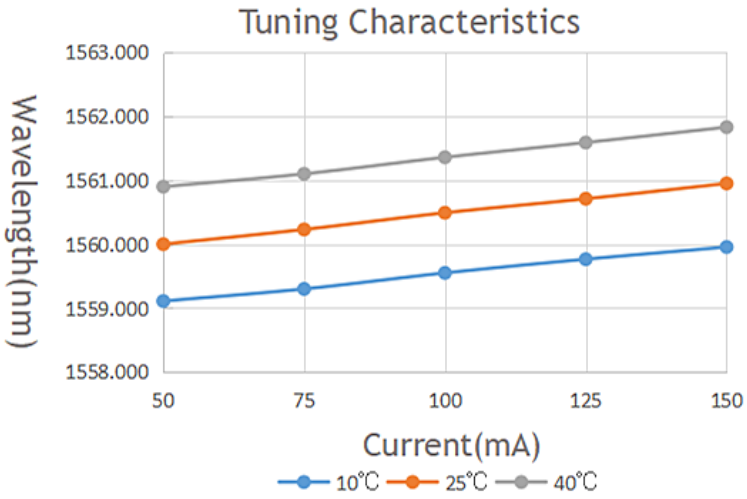
Obrázek č. 48: Návrh experimentu s laserem

Tabulka č. 1: Specifikace laseru – při 25 °C [29]

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Centre Wavelength	λ	1559.5	1560.0	1560.5	nm
Side Mode Suppression Ratio	SMSR	30	40		dB
Threshold Current	Ith		20	30	mA
Operating Current	Iop		80	120	mA
Chip output Power	Pf	10	15	30	mW
Quantum Efficiency	η	0.08	0.12		mW/mA
Current Tuning Coefficient	Δλ/ΔI		0.015		nm/mA
Temperature Tuning Coefficient	Δλ/ΔT		0.12		nm/K
Forward Voltage	Vf		1.3	2	V
Thermistor Resistance	RT	9.5	10	10.5	KΩ
Thermistor Temp. Coefficient			-4.4		%/°C
Connector	FC/APC				



Obrázek č. 49: Vyzařované spektrum laseru [29]



Obrázek č. 50: Drift vlnové délky laseru v závislosti na teplotě a proudu [29]

Snímání útlumu SMS struktury zajišťuje fotodioda citlivá na vlnovou délku laseru, přesněji v rozsahu 850–1700 nm pod označením ODE12XX od výrobce O-Send [30].

Provedení experimentálního měření s využitím širokopásmového zdroje světla a OSA jako výstupního snímače máme přehled o celém spektru (ohyb je stanoven z více vlnových délek). Pomocným programem lze ze zadaných dat vyhodnotit přibližný ohyb OPV. Jelikož vyhodnocení velikosti ohybu s OSA se realizuje na základě změn v celém změřeném spektru, vyhodnocení by mělo být přesnější než zjednodušená metoda s laserem, která vyhodnocení ohybu stanoví pouze z jedné vlnové délky. Oproti tomu, zjednodušená metoda vyhodnocení ohybu využívá dostupnější součásti, je tak snáze realizovatelná a cenově přijatelnější, než použití OSA (Tabulka č. 3) právě kvůli pořizovacím nákladům na OSA.

Tabulka č. 2: Optické a elektrické parametry fotodiody [29]

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Remark	Test Condition
Wavelength Range	λ	850	—	1700	nm		—
Power Range	P	-70	—	6	dBm		Vr=5V,Rl =50Ω
Dark Current	Id	—	0.1	1	nA	Φ300um	Vr=5V
		—	—	3	nA	Φ500um	Vr=5V
		—	—	5	nA	Φ1000um	Vr=0V
		—	0.5	—	nA	Φ2000um	Vr=0V
Responsivity	R	—	0.85	—	A/W		Vr=5V, λ=1310 nm
Accuracy		—	—	±0.25	dB		@25°C
Capacitance	Ct	—	—	5	pF	Φ300um	Vr=5V, f=1MHz
		—	—	13	pF	Φ500um	
		—	—	25	pF	Φ1000um	
Response Time	Tr	—	—	1	ns	Φ300um	Vr=5V, 10~90%
		—	—	5	ns	Φ500um	
		—	—	20	ns	Φ1000um	

Tabulka č. 3: Porovnání nákladů vyhodnocovacích metod

Metoda vyhodnocená s OSA		**Zjednodušená metoda s laserem**	
Superluminiscenční dioda	1 500 €	Laserová dioda	1 200 €
OSA	16 000 €	Fotodioda	100 €
Celková suma	**17 500 €**		**1 300 €**

Za zmínku určitě stojí zmínit i podmínky měření, kdy například okolní teplota může ovlivnit celkové výsledky. Zvýšená teplota zvětší útlum OPV. Navíc vlivem rostoucí teploty dochází rovněž k roztažnosti OPV jak v průměru, tak i jeho délky. Rostoucí délka má zase vliv na mechanické napětí upevněného vlákna. Navíc pokud se vlákno v tento okamžik ohýbá, zvětšená délka vlákna má za následek i zvětšení lokálního poloměru ohybu kolem napínacího trnu. Kombinace všech těchto vlivů se odrazí na útlum, tvar a spektrální drift SMS struktury, což se musí při návrhu zjednodušené metody zohlednit. V opačném případě by senzor nemohl správně fungovat. Vlivem spektrálního driftu může nastat situace, kdy se vyzařovaný vrchol laserové diody dostane ve spektru SMS struktury do míst, kde je na ohyb necitlivá. Samotný laser [29] je vysoce koherentní a jeho spektrální vrchol se posouvá o ±1 nm v teplotním rozsahu 10 – 40 °C (Obrázek č. 50) a není tak na jeho teplotní změnu stejně jako u fotodioda třeba příliš brát zřetel.

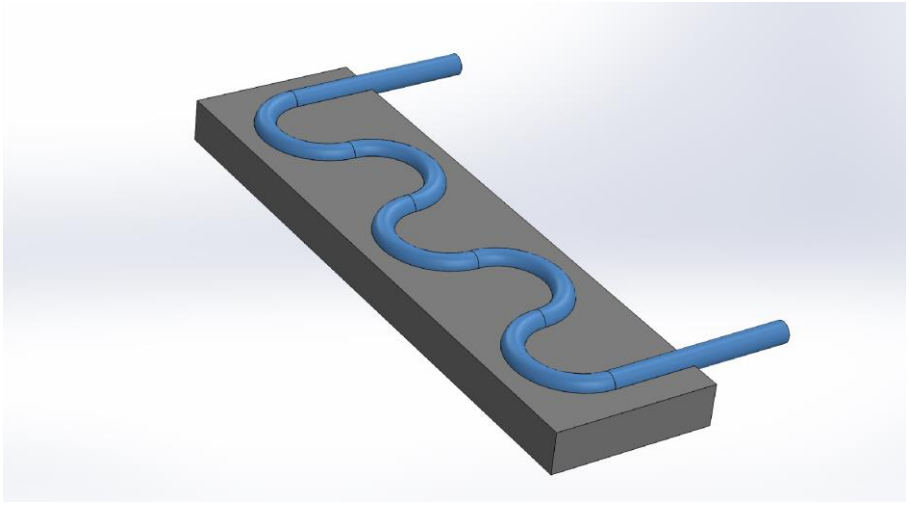
10 KONCEPT NÁVRHU SNÍMAČE V PRAXI

Během realizace této práce jsem uvažoval i nad jinými koncepty OPV SMS senzorů. Většinou se jednalo o jinou konstrukci senzoru za účelem docílit ještě lepších výsledků měření. Jak jsem již zmínil, v tomto projektu se neměří pouze ohyb, ale kumulativní efekt ohybu a mechanického napětí. Pro odstranění mechanického napětí jsem uvažoval provést podobný experiment jako v této práci (Obrázek č. 20), ale s pomocnými posuvy, na kterých by byly umístěny otočné montážní odstavce. Tyto posuvy by mechanické napětí eliminovaly. Vytvořené programové vybavení v LabVIEW je pro tento experiment již připraveno (kapitola 7). Mimo jiné jsem se ale snažil vymyslet i koncept senzoru s odlišným principem měření a pokud možno s měřením čistě ohybu vlákna.

10.1 Optovláknový senzor s vícemódovou částí tvaru meandru

V předchozích kapitolách jsem uvažoval a pracoval pouze s přímými SMS struktury, který byly ohýbány pouze na jednom místě trnem. Veškeré změny ve změřeném spektru pramení jen z tohoto jednoho ohybu. Uvažoval jsem koncept s využitím vícenásobného ohybu SMS struktury, čímž by se teoreticky měla zvýšit citlivost senzoru na ohyb (Obrázek č. 51).

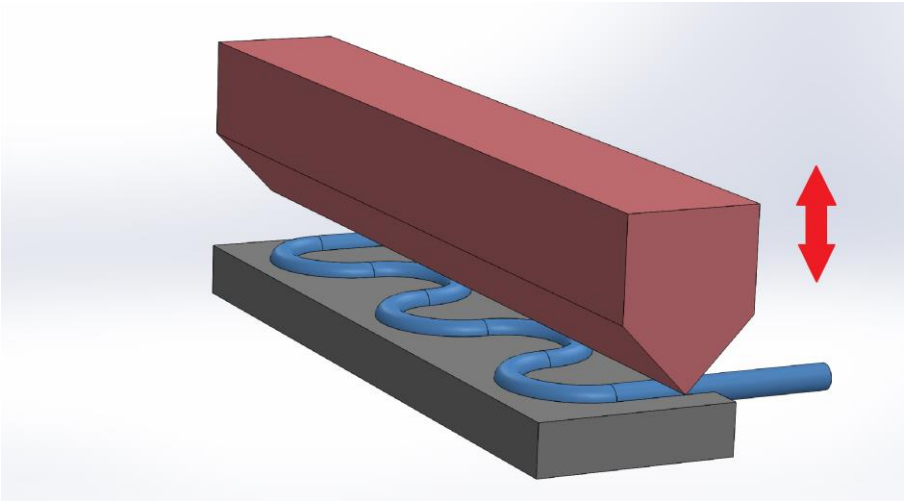
Vytvořila by se opět SMS struktura, která by měla vícemódovou část připevněnou k pružné podložce ve tvaru meandru (Obrázek č. 51). Ohyb by pak byl proveden z horní strany meandru (Obrázek č. 52). Trn by pak ohýbal OPV na více než jednom místě a vzniklý celkový útlum by se pro některé vlnové délky kumuloval. Tím pádem by i malý ohyb způsobil velkou změnu ve spektru a senzor by měl být citlivější, což je výhodou.



Obrázek č. 51: Koncept optovláknového senzoru – meandr

Jako nevýhody tohoto konceptu vidím úplné přilepení OPV k podložce. Při ohybu by docházelo i k mechanickému napětí. Výsledkem měření by byl kumulativní efekt ohybu a mechanického napětí. Dále by bylo třeba ověřit, jak velký poloměr meandru lze použít. Příliš malý poloměr oblouků může způsobit utlumení veškerého záření v OPV a senzor

by se stal nepoužitelný nebo by hrozilo jeho zlomení v oblouku. Naopak velký poloměr oblouků fyzicky zvětší celý senzor a pro některé aplikace by se stal nevhodným.



Obrázek č. 52: Koncept optovláknového senzoru – meandr s trnem

Praktické použití koncept optovláknového senzoru s meandry vidím například v průmyslových váhách jako náhradu tenzometru, kde by byly kladeny přísnější požadavky na citlivost nebo v prostředí nutně vyžadující použití neelektrického principu snímání. Pro stanovení ohybu lze použít již zmíněnou metodu vyhodnocení s OSA nebo zjednodušenou metodu laserem a fotodiodou.

Výhody:

- Jednoduchost
- Vyšší citlivost

Nevýhody:

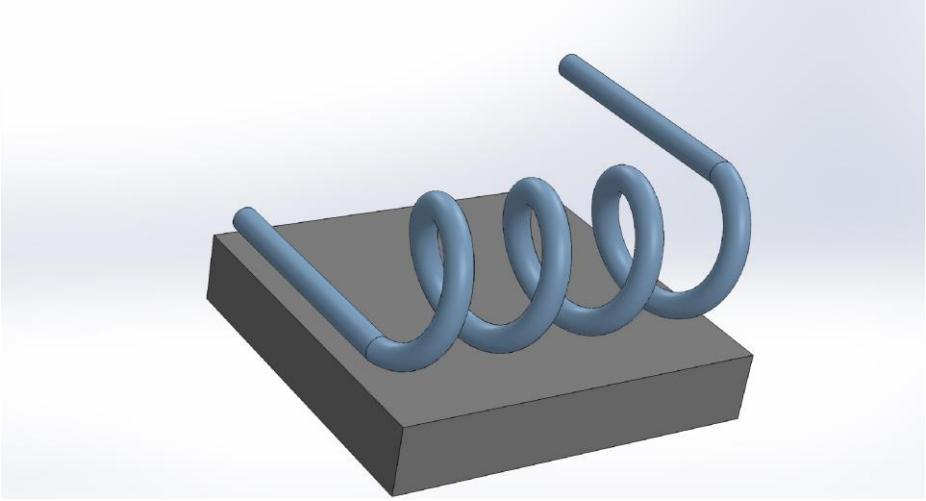
- Kumulativní efekt ohybu a mechanického napětí
- Malá odolnost vůči změnám teploty

Měření signálu z tohoto OVS by bylo možné realizovat pomocí super luminiscenční diody s OSA. Využití zjednodušené metody s laserem a fotodiodou by bylo možné podle tvaru spektra a útlumu struktury při těchto větších poloměrech ohybu.

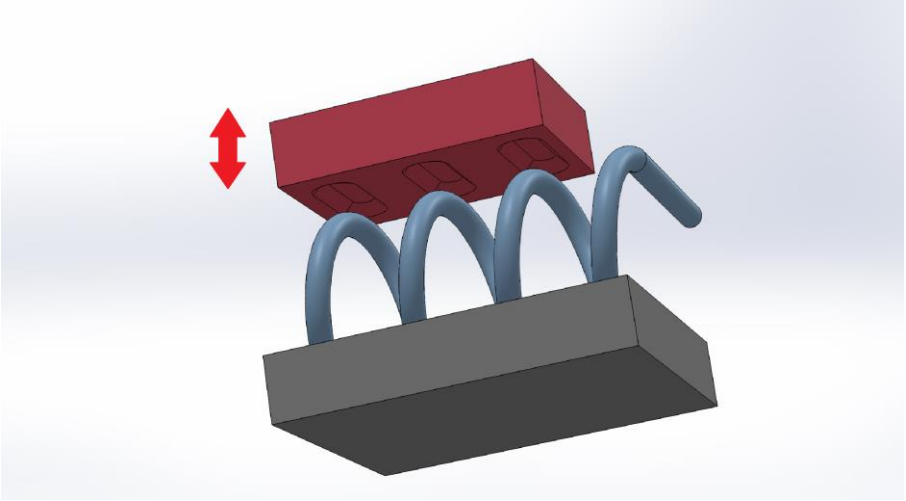
10.2 Optovláknový senzor se spirálovou vícemódovou částí

Oproti konceptu optovláknového senzoru tvaru meandru jsem vymyslel OVS, kdy bude OPV svinuto na pár závitů do spirály (Obrázek č. 53). Při výrobě by bylo třeba zvolit vhodný počet závitů spirály tak, aby při jejich vyšším počtu nebylo záření ve vlákně příliš utlumeno nebo jím zcela pohlceno. S tím se pojí i volba vhodného vlákna a velikosti poloměru závitu. Příliš velký poloměr by zapříčinil velké fyzické rozměry senzoru a u příliš malého poloměru by hrozilo zlomení OPV. Výroba spirály by byla možná

například navinutím horkého vlákna kolem kulaté konstrukce. Navinuté OPV by vychladlo a ztuhnulo v požadovaném spirálovitém tvaru a odstranila by se pomocná konstrukce. Spodní část OPV by byla ve styčných bodech mechanicky upevněna k nepružné podložce. To zajistí OPV proti křížení a prokluzu po podložce. Na takto upevněné OPV by z horní části tlačil kryt, který by byl součástí senzoru a deformoval OPV po jeho obvodu. V horní části by se rovněž mohl nacházet zářez, který by zamezil prokluzu OPV při vzniklé deformaci (Obrázek č. 54). Žádná část OPV by pak nebyla pod mechanickým napětím a měřen by byl pouze ohyb.



Obrázek č. 53: Koncept optovláknového senzoru – spirála



Obrázek č. 54: Koncept optovláknového senzoru – spirála s trnem

Výhody:

- Malé rozměry
- Snímání jen ohybu
- Vysoká citlivost na ohyb

Nevýhody:

- Složitější výroba
- Malá odolnost vůči změnám teploty
- Vysoká citlivost na vibrace/otřesy

Měření signálu z tohoto OVS by bylo možné realizovat pomocí super luminiscenční diody s OSA. Využití zjednodušené metody s laserem a fotodiodou by bylo možné podle tvaru spektra a útlumu struktury při těchto větších poloměrech ohybu.

10.3 Porovnání s jinými senzory

Oba koncepty senzorů (kapitola 10.1, 10.2) by měly praktické využití při měření tlaku nebo tíhy. Mohly by tak sloužit jako alternativa pro tenzometry nebo kapacitní snímače.

10.3.1 Tenzometry

Tenzometry jsou senzory pro měření deformací, tlaků, ohybu a sil působících na ně.

Výhody:

- Snadný zpracování výstup. signálu
- Velký měřící rozsah
- Lineární převodní charakteristika (drátový nebo fóliový)
- Teplotní rozsah (až 180 °C)
- Mechanická odolnost
- Malý vliv teplotních změn
- Nízká cena

Nevýhody:

- Z galvanických materiálů
- Malá citlivost (drátový nebo fóliový)

Tenzometry jsou oproti OVS v průmyslu daleko více rozšířené. Tomu přispívá mechanická odolnost, nízký vliv teplotních změn a snadné zpracování výstupního signálu tenzometrů. V mnoha aplikacích jsou OVS až zbytečně moc citlivé a pořizovací náklady vysoké. To znesnadňuje rozšíření OVS.

10.3.2 Kapacitní snímače

Kapacitní tlakové sensory vyhodnocují nejčastěji změny tlaku nebo ohybu. Výstupní signál je nutné zpracovat obslužnou elektronikou, například převodníkem kapacita/frekvence.

Výhody:

- Vysoká citlivost
- Velmi malé rozměry
- Velký pracovní teplotní rozsah

Nevýhody:

- Nelineární převodní charakteristika
- Složitější zpracování signálu
- Z galvanických materiálů

Oproti tenzometrů mají kapacitní snímače daleko větší citlivost, srovnatelnou (záleží na typu senzoru) s OVS. V čem jsou ale OVS lepší než kapacitní i tenzometry je galvanická nevodivost, odolnost vůči chemicky agresivnímu a ionizujícímu záření, snadné a rychlé vyhodnocení signálu. OVS proto nalézají své uplatnění v letectví, kosmonautice, stavebnictví, energetice, komunikace, aj. Porovnání obtížnosti výroby těchto senzorů nelze posoudit, jelikož jde pouze o hypotetické koncepty, u kterých byl kladen důraz spíše na nové konstrukce senzorů měřicích, pokud možno pouze ohyb OPV.

11 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zorientovat se v dané problematice optovláknových senzorů, popsat a objasnit děje v optovláknových strukturách, především pak ve vícemódových částech struktur typu SMS, pokusit se nasimulovat propagaci světelného záření uvnitř vícemódového optického vlákna, navrhnout a vytvořit automatizované měřicí pracoviště pro měření absorpčního spektra. Nakonec jsem navrhl zjednodušenou a finančně přijatelnější metodu vyhodnocení ohybu.

Začátek práce se zabývá historií a popisem optických dějů, jejichž porozumění bylo klíčové pro další kapitoly. Ty se věnují optickým vláknům. V podkapitolách jsem se zaměřil na princip vláken, jejich použití jak v měřicí technice, tak v telekomunikacích. Dále jsem popsal, co to jsou módy a ukázal výpočet pro jejich možný počet ve vlákně. U jednomódových vláken jsem se zabýval změnou vlastností pomocí změny numerické apertury. Následoval rozbor typů optických vláken a princip průchodu záření nimi. Dále jsem vypracoval rozbor a popis optovláknových senzorů, které se běžně používají v praxi (například Braggovy mřížky) včetně nejzákladnějších principů funkce OVS a jejich popisu. Tato práce se zabývá optovláknovými senzory s využitím vícemódové interference v SMS strukturách. Popsal jsem jak se SMS struktury vytváří a jak funguje vícemódová interference v optickém vlákně (vícemódové části). Následně jsem se věnoval softwarovým simulacím optických vláken SMF a MMF. Ty byly prováděny v programovém prostředí Comsol. Z počátku se tento program jevil jako velmi užitečný nástroj, i když ne vždy zcela uživatelsky přívětivý. Po mnoha hodinách práce se začaly objevovat nedostatky programu popsané v této práci. Ty společně s nedostupností návodů k programu a jeho nastavení vedly k rozhodnutí o opuštění programu a nalezení vhodnější náhrady. Kandidátem se ukázal být právě už používaný Matlab. V Matlabu jsem odsimuloval vstupní profil záření vstupujícího do vlákna a dokázal propagaci záření výhradně v jádru vlákna.

Pokračováním této práce je příprava experimentu v laboratořích fakulty. Rozhodl jsem se na SMS strukturách měřit ohyb optického vlákna. Ve skutečnosti kvůli aktuálnímu návrhu experimentu nebylo možné měřit čistě samotný ohyb vlákna, nýbrž kumulativní efekt ohybu a mechanického napětí optického vlákna. V návrhovém softwaru SolidWorks jsem vytvořil modely montážních částí potřebné k provedení samotného experimentu, které jsem následně vytiskl na fakultní 3D tiskárně. Zároveň s tiskem jsem v laboratořích vytvářel programové vybavení pro obsluhu lineárního posuvu a optického spektrálního analyzátoru. Ty budou použity pro automatizované vyčítání spekter z OSA. Programové vybavení automatizovaného měření provádí opakované měření místo ručního měření uživatelem. Zvýší se tím přesnost, rychlost a především opakovatelnost měření. To jsem nakonec bohužel nepoužil a data nezměřil, kvůli uzavření laboratoří z důvodu virové pandemie Covid-19. Od konzultanta jsem získal již starší změřená data a pracoval s nimi na zpracování a především vyhodnocení ohybu z SMS struktury. Charakter dat byl dán změnami výstupního spektra při působení

dané fyzikální veličiny. Na vyhodnocení zadaných dat z měření ohybu SMS struktur jsem aplikoval umělou neuronovou síť. Při jejím učení jsem vyzkoušel dva učící algoritmy, které jsem navzájem porovnal. Na základě míry shody s žádanými hodnotami jsem zjistil, že pro vyhodnocení ohybu s takovýmto charakterem dat se nejlépe hodí algoritmus Levenberg-Marquardt. To především kvůli malé odchylce při vybavování na novém spektru. Kromě zpracování dat jsem se zabýval také možností jiných metod vyhodnocení ohybu bez použití optického spektrálního analyzátoru. Teoreticky by k tomu stačilo použít pouze úzkopásmový zdroj světla (např. laser) a senzor (např. fotodiodu) – oba pracující na stejné vlnové délce. Tím by se docílilo vyhodnocení ohybu za přibližně desetinové náklady oproti metodě s vyhodnocením OSA.

Při realizaci této práce jsem přemýšlel o jiných konceptech optovláknových senzorů, které by pokud možno neměřili kumulativní efekt ohybu a mech. napětí, ale jen čistě ohyb. O mém návrhu konceptů, popisu a porovnání předpokládaných výhod a nevýhod oproti OVS těchto senzorů pojednává kapitola jedenáctá.

Podle mého názoru by bylo dobré v budoucnu pokračovat ve snaze o měření čistě ohybu OPV, tedy odstranit vliv mechanického napětí vlákna. Docílit toho by bylo možné například pomocnými posuvy zmíněnými v této práci, pro které jsem již připravil programové vybavení. Posuv pomocných pojezdů by mohl být řízen na základě lineární funkce nebo by se dal na montážní čelist připevnit například citlivý tenzometr. Program by ovládal pomocné posuvy a snažil se o udržení nulového tahu (mechanického napětí), ale zároveň i o to, aby nedocházelo k prověšení OPV.

LITERATURA

[1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. S. 890. ISBN 80-214-1868-0.

[2] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky 1: Fundamentals of photonics*. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-85863-01-4.

[3] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky 2: Fundamentals of photonics*. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-85863-02-2.

[4] KUCHARSKI, Maciej a Pavel DUBSKÝ. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. 1. vydání Mikrokom Praha 1998

[5] STRNAD, Stanislav. *Optická vlákna a telekomunikace*. 2. vydání Praha 1991, ISBN 80-900721-0-0

[6] NAVRÁTIL, Jiří a Pavel LORENZ. *Učebnice Elektrotechniky: Optoelektronika* [online]. [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/810

[7] A. W. SNYDER and J. D. LOVE, *Optical Waveguide Theory, Chapman and Hall*, London (1983)

[8] T. TYC, *Světlo v multimodových optických vláknech*, *Československý časopis pro fyziku*. Praha: Akademie věd České republiky, Fyzikální ústav, 1951-. ISSN 0009-0700(print).

[9] *What is the difference between diffraction and interference of light?* [online]. 27.10.2014 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: https://physics.stackexchange.com/questions/137860/what-is-the-difference-between-diffraction-and-interference-of-light?noredirect=1

[10] *Linear polarized 3D glasses and the physical shape of light waves* [online]. 26.1.2016 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: https://physics.stackexchange.com/questions/231962/linear-polarized-3d-glasses-and-the-physical-shape-of-light-waves

[11] *Disperze světla* [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: http://www.fyzika007.cz/optika/disperze-svetla

[12] *General structure of optical fibers: Physical aspects 1* [online]. 19.11.2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: https://www.technobyte.org/general-structure-of-optical-fibers-physical/

[13] *Fiber Optic Cable Types – Multimode and Single Mode: TECHNICAL NOTE: Fiber Optic Cable Types* [online]. 21.1.2019 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: https://www.rfindustries.com/resources/articles/fiber-optic- cable-types-multimode-and-single-mode.php

[14] VOJÁČEK, Antonín. *Optovláknové snímače teploty pro náročná měření* [online]. 27. 3.2006 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz/clanek/2006032701

[15] *Multiple-use Pre-clinical: Pressure Catheter* [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: https://fiso.com/wp-content/uploads/2018/10/Brochure-promotionnelle-Life-Sciences_MC-00257.pdf
[16] Q. WANG, G. FARRELL and W. YAN, *Investigation on Single-Mode–Multi-mode–Single-Mode Fiber Structure*, in Journal of Lightwave Technology, vol. 26, no. 5, pp.512-519, March 1,2008. doi: 10.1109/JLT.2007.915205
[17] W. S. MOHAMMED, A. MEHTA and E. G. JOHNSON, *Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference*, in Journal of Lightwave Technology, vol. 22, no. 2, pp.469-477, Feb.2004. doi: 10.1109/JLT.2004.824379
[18] HANÁČEK, F., J. LÁTAL a P. KOUDELKA. *Nový způsob měření pomocí vláknově optických senzorů s frekvenční změnou na výstupu*. Ostrava, 2009. ISSN 1213-1539.
[19] URBAN, František. *Braggovy mřížky v optických vláknech*. Brno, 2014. Diplomová práce. FEKT VUT. Vedoucí práce MILOSLAV FILKA.
[20] *Comsol* [online]. 2020 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.comsol.com
[21] *Matlab* [online]. 2020 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.mathworks.com
[22] *Standa* [online]. 2020 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: http://www.standa.lt
[23] *Bristol Instruments* [online]. 2020 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.bristol-inst.com
[24] *SolidWorks* [online]. 2020 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.solidworks.cz
[25] *Průša3D* [online]. 2020 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.prusa3d.cz
[26] MARALÍK, Marek. *Ovladače k měniči pro krokové motory*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
[27] *Deep Learning Toolbox. Mathworks* [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/products/deep-learning.html
[28] *LASER SPECTRUM ANALYZER 771 Feature. In: Bristol-inst* [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: https://www.bristol-inst.com/wp-content/uploads/2019/12/bristol-bro-771LaserSpectrumAnalyzer.pdf
[29] *1560nm DFB SM Laser diode. LD-PD INC* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=577#bk1
[30] *InGaAs Photo diode. China CN* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: https://detail.en.china.cn/provide/p130928521.html
[31] KOTYA KARAPETYAN (2020). *Optical Fibre Toolbox* (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27819-optical-fibre-toolbox), MATLAB Central File Exchange. Retrieved April 29, 2020.
[32] SKALSKÝ, Michal. *Zadaná testovací data SMS struktury*. Brno, 2020. Data získána z Q8384 Optical Spectrum Analyzer.

Příloha A – CD/DVD

- Program automatizovaného měření
- Simulace
- Text závěrečné práce
- UNS
- Výkresy dílů