



# 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 SNÍMAČ VÝŠKY HLADINY

FIBER-OPTIC LIQUID LEVEL SENSOR

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Ondra

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Skalský

BRNO 2021



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Dominik Ondra

**ID:** 203536

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Optovláknový snímač výšky hladiny

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh, realizace a porovnání různých snímacích principů pro spojitě měření výšky hladiny s využitím optických vláken. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Proveďte literární rešerši na téma šíření záření optickými vlákny a prvky různého typu (single-mode fiber, no-core fiber, tapers, couplers). Analyzujte využití těchto jevů pro spojitě snímání výšky hladiny kapalin s různým indexem lomu.
- 2) S využitím svářečky Fujikura FSM-100P+ realizujte tapers různých parametrů a zpracujte dokumentaci k jejich výrobě.
- 3) Na základě teoretického rozboru realizujte snímače na bázi vybraných struktur, prakticky ověřte jejich funkčnost a stanovte jejich vlastnosti.
- 4) Proveďte kalibraci vybraného snímače.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SALEH, Bahaa EA; TEICH, Malvin Carl. Fundamentals of photonics. John Wiley & sons, 2019.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 24.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Skalský

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Tato práce shrnuje fyzikální principy, které jsou využívány při práci s optickými vlákny a mohou být použity pro výrobu snímače výšky hladiny. Jsou popsány různé druhy optických vláken a struktur z nich vytvořených. V práci jsou shrnuty již existující optovláknové a ostatní snímače hladiny. Byly vytvořeny tři návrhy modelu spojitého snímače výšky hladiny a ověřena jejich funkčnost. První na základě proměnného útlumu vlákna, druhý pracující s proměnlivým indexem lomu prostředí a třetí na principu fázového zpoždění světla. V práci je dále popsán splicer Fujikura FSM 100P+ a je ukázáno jaké výrobky je splicer schopen vytvořit. Snímač na principu proměnného indexu lomu prostředí byl kalibrován.

## **Klíčová slova**

Optické vlákno, optovláknový taper, optický snímač výšky hladiny, Fujikura FSM 100P+, Svářečka vláken

## **Abstract**

This text summarizes scientific principles that are used in fiber optics field, and could be used to design liquid level sensor. Different types of optic fibers and advanced optic structures are analyzed for liquid level sensor usage. Mechanisms of already existing types of optic fiber liquid level sensors and other mechanism liquid level sensors are characterized. Three sensor designs are proposed. One working with different levels of attenuation when bending the fiber. The other measuring different refraction indexes of the environment and the last one based on phase delay of light. Viability of these principle has been tested. Text also describes optic fiber splicer Fujikura FSM 100P+ and optic fiber structures that it is able to produce. Sensor based on refraction index of environment has been calibrated.

## **Keywords**

Optic fiber, Optic fiber taper, Optical liquid level sensor, Fujikura FSM 100P+, Fiber splicer

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Skalskému za účinné a systematické vedení mé bakalářské práce. A za další cenné rady.

V Brně dne: 23. 05. 2021

.....

Podpis autora

## **Bibliografická citace**

ONDRA, Dominik. Optovláknový snímač výšky hladiny [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134750>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Michal Skalský.

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<b>Dominik Ondra</b>
<b>VUT ID studenta:</b>	<b>203536</b>
<b>Typ práce:</b>	<b>Bakalářská práce</b>
<b>Akademický rok:</b>	<b>2020/21</b>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<b>Optovláknový snímač výšky hladiny</b>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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: 23.05.2021

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1. LITERÁRNÍ REŠERŠE</b> .....	<b>12</b>
1.1.1 Světlo.....	12
1.1.2 Viditelné světlo.....	12
1.1.3 Optické prostředí .....	12
1.2 JEVY NA ROZHRANÍ DVOU PROSTŘEDÍ .....	12
1.2.1 Odraz .....	12
1.2.2 Lom světla .....	13
1.3 OPTICKÁ VLÁKNA .....	13
1.3.1 Šíření světla optickým vláknem .....	13
1.3.2 Útlum .....	13
1.3.3 Minimální poloměr ohybu.....	14
1.3.4 Průměr vidového pole .....	14
1.4 DRUHY OPTICKÝCH VLÁKEN .....	15
1.4.1 Optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu.....	15
1.4.2 Optické vlákno s gradientní změnou indexu lomu.....	15
1.4.3 Jedno vidová vlákna.....	15
1.4.4 Více vidová vlákna .....	16
1.4.5 Tapery.....	16
1.4.6 Couplery.....	17
1.4.7 NCF.....	18
<b>2. SNÍMAČE HLADINY</b> .....	<b>19</b>
2.1 OPTICKÉ SNÍMAČE HLADINY .....	19
2.1.1 Optický sensor výšky hladiny na principu měření intenzity záření .....	19
2.1.2 Optický sensor hydrostatického tlaku .....	20
2.1.3 Párování optických vlnovodů.....	20
2.2 OSTATNÍ SNÍMAČE VÝŠKY HLADINY .....	20
2.2.1 Ultrazvukový snímač hladiny .....	20
2.2.2 Hydrostatický snímač hladiny .....	21
<b>3. VLASTNÍ NÁVRH OPTOVLÁKNOVÉHO SNÍMAČE HLADINY</b> .....	<b>22</b>
3.1 KONSTRUKCE.....	22
3.1.1 Vysílač.....	22
3.1.2 Přijímač .....	22
3.2 SNÍMAČ NA PRINCIPU ÚTLUMU ZPŮSOBENÉHO OHYBEM .....	23
3.2.1 Aproximace elipsy.....	24
3.2.2 Útlum snímače .....	24
3.2.3 Výpočet útlumu snímače.....	26
3.3 TAPEROVÉ SNÍMAČE.....	28
3.3.1 Intenzitní vyhodnocení .....	30
3.3.2 Interferometrické vyhodnocení.....	30

<b>4. FUJIKURA FSM 100-P+</b> .....	<b>31</b>
4.1 VYTVÁŘENÍ SVÁRŮ OPTICKÝCH VLÁKEN .....	31
4.2 VYTVÁŘENÍ TAPERŮ.....	32
4.2.1 Nastavení taperu .....	32
4.2.2 Geometrické rozměry:.....	33
4.2.3 Nastavení manipulace vlákna .....	34
4.2.4 Vícenásobné taperování.....	36
<b>5. KONSTRUKCE SNÍMAČŮ</b> .....	<b>37</b>
5.1 SNÍMAČ NA PRINCIPU ÚTLUMU ZPŮSOBENÉHO OHYBEM.....	37
5.1.1 Poloměr smyčky .....	37
5.1.2 Měřicí aparatura.....	38
5.1.3 Měření.....	38
5.1.4 Zhodnocení.....	39
5.2 INTENZITNÍ TAPEROVÝ SNÍMAČ.....	40
5.2.1 Rozměry optovláknového taperu .....	40
5.2.2 Tloušťka pasu taperu .....	40
5.2.3 Poměr délek kužele a pasu taperu.....	41
5.2.4 Měřicí aparatura.....	42
5.2.5 Měření.....	42
5.2.6 Taper s průměrem pasu 20 $\mu$ m .....	42
5.2.7 Taper s průměrem pasu 15 $\mu$ m .....	43
5.2.8 Taper s průměrem pasu 10 $\mu$ m.....	44
5.2.9 Zhodnocení.....	45
5.3 INTERFEROMETRICKÝ TAPEROVÝ SNÍMAČ.....	46
5.3.1 Průběh měření.....	46
5.3.2 Polarizace světla .....	47
5.3.3 Měření.....	47
5.3.4 Zhodnocení.....	49
<b>6. KALIBRACE SNÍMAČE</b> .....	<b>50</b>
6.1.1 Výběr snímače.....	50
6.1.2 Kalibrace .....	50
6.1.3 Zhodnocení.....	51
<b>7. ZÁVĚR</b> .....	<b>52</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>54</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>56</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Průměr vidového pole[17].....	14
1.2	Průřez step-index a graded-index vláknem[16].....	15
1.3	Vytaperované vlákno[15].....	16
1.4	Rozložení intenzity záření v optickém coupleru[6]......	17
2.1	Citlivý element snímače hladiny na principu měření intenzity záření[8].....	19
3.1	Blokový diagram návrhu optického snímače výšky hladiny.....	22
3.2	Ukázka návrhu snímače hladiny ve výchozí pozici.....	23
3.3	Ukázka návrhu snímače hladiny při poklesu hladiny.....	24
3.4	Aproximace elipsy čtyřmi kruhovými oblouky.....	25
3.5	Graf naměřené závislosti útlumu optického vlákna na průměru zahnutí závitů[12].....	25
3.6	Graf závislosti útlumu návrhu senzoru na posunu hladiny.....	28
3.7	Návrh snímače výšky hladiny na principu proměnného indexu lomu.....	29
3.8	Simulace průmětu intenzity záření pro vlákno ve vodě a ve vzduchu.....	30
4.1	Snímek svářečky Fujikura FSM 100-P series[14].....	31
4.2	Graf výstupu funkce measure pro přetrhlé vlákno.....	32
4.3	Fotografie taperu vytvořeného na svářečce Fujikura- FSM 100P+.....	33
4.4	Graf výstupu funkce measure pro vlákno o průměru pasu 70 $\mu\text{m}$ .....	34
4.5	Graf výstupu funkce measure při zapnutém sweepu a průměru pasu 55 $\mu\text{m}$ .....	35
4.6	Graf výstupu funkce measure při vypnutém sweepu a průměru pasu 55 $\mu\text{m}$ .....	35
5.1	Naměřené hodnoty závislosti útlumu na posunu vodní hladiny.....	38
5.2	Průmět základního modu při různém průměru jádra.....	40
5.3	Simulace průmětu intenzity záření pro různá vlákna.....	41
5.4	Graf závislosti RVZ na výšce vodní hladiny pro 20 $\mu\text{m}$ taper.....	43
5.5	Graf závislosti RVZ na výšce vodní hladiny pro 15 $\mu\text{m}$ taper.....	44
5.6	Graf závislosti RVZ na výšce vodní hladiny pro 10 $\mu\text{m}$ taper.....	45
5.7	Schéma interferometrického snímače.....	46
5.8	Snímek obrazovky osciloskopu pro nulovou hladinu.....	47
5.9	Snímek obrazovky osciloskopu při zvyšování hladiny v oblasti pasu.....	48
5.10	Snímek obrazovky osciloskopu při zvyšování hladiny mimo oblast pasu.....	48
5.11	Snímek obrazovky osciloskopu při zvyšování hladiny bez přítomnosti taperu.....	49
6.1	Graf závislosti relativní výkonové ztráty na posunu hladiny.....	51

## SEZNAM TABULEK

3.1	Odečtené hodnoty při deformaci elipsy posun a průměr .....	26
3.2	Odečtené hodnoty při deformaci elipsy úhel.....	26
3.3	Výsledné hodnoty celkového útlumu elipsy pro různé posuny .....	27
4.1	Výsledky dokončení taperu pro různá nastavení .....	33
5.1	Tabulka naměřených hodnot pro první měřitelnou změnu.....	37
5.2	Tabulka naměřených hodnot pro první měřitelnou změnu útlumu.....	41

# ÚVOD

Měření výšky hladiny je jedna ze základních úloh v oblasti průmyslového sektoru. Pomocí výšky hladiny se měří jak průtok, tak i materiálové množství v různých nádržích a tancích. Ne všechny prostory jsou vhodné pro použití běžných snímačů výšky hladiny. Pokud je prostředí vznětlivé, nebo není magneticky odstíněno, může být použití běžných snímačů nebezpečné nebo nepřesné. Zde se jeví jako vhodné použití optovláknových snímačů.

Hlavním cílem této práce je analyzovat fyzikální principy a optovláknové struktury, a rozhodnout, zdali jsou vhodné pro výrobu spojitého snímače výšky hladiny. Dále navrhnout a otestovat optovláknové snímače výšky hladiny a jeden návrh zkalibrovat.

K výrobě optovláknových struktur byla použita svářečka Fujikura FSM-100P+.

Práce je rozdělena do šesti kapitol. První kapitola se zabývá literární rešerší. Popsány jsou jak fyzikální principy využívané pro funkci optických vláken, tak vybrané optovláknové struktury.

Druhá kapitola obsahuje průzkum již existujících optovláknových snímačů výšky hladiny. Také je zde stručný přehled nejpoužívanějších snímačů fungujících na jiném než optickém principu. Jsou zmíněny některé výhody a nevýhody různých druhů snímačů.

Ve třetí kapitole jsou prezentovány tři vlastní návrhy snímače. První, fungující na základě změny útlumu při ohnutí vlákna, druhý a třetí pracující s proměnným indexem lomu prostředí. Je popsána funkčnost snímačů a u prvního návrhu je aproximována rovnice charakterizující změnu útlumu snímače při změně výšky hladiny.

Čtvrtá kapitola obsahuje stručnou specifikaci spliceru Fujikura FSM-100P+. Jelikož je taper využíván ve dvou z teoretických návrhů snímače, velká část kapitoly je věnována hledání ideálního nastavení spliceru pro vytvoření co nejužšího taperu.

V páté kapitole probíhá praktické měření s modely snímačů vycházejících z teoretických návrhů. Je otestována jejich funkčnost, změřeny charakteristiky a analyzováno, jestli mohou být použity jako spojitý snímače hladiny.

V poslední kapitole je kalibrován intenzitní taperový snímač. A to určením nejistoty měření a provedením testovacího měření.

# 1. LITERÁRNÍ REŠERŠE

## 1.1.1 Světlo

Na světlo lze pohlížet jako na proud fotonů nebo jako na elektromagnetické vlnění. Pokud je na něj pohlíženo jako na vlnu, je periodické. Proto je k popsání používána veličina Frekvence. Popřípadě jí nepřímo úměrná veličina a tou je Perioda. Frekvence nám určuje počet kmitů vlny za jednu sekundu a perioda nám říká, jak dlouhý jeden kmit bude. S měnícím se kmitočtem se mění také charakter elektromagnetického vlnění. Nejmenší vlnovou délku má Gama záření. A největší vlnovou délku mají rádiové vlny. S klesající vlnovou délkou se také snižuje energie, která je vlnou nesena.[2]

## 1.1.2 Viditelné světlo

Viditelné světlo se pohybuje v rozmezí vlnových délek 390nm – 770nm. Vlnové délky mezi těmito hranicemi vnímá lidské oko jako jednotlivé barvy. Hranice mezi viditelným a neviditelným elektromagnetickým zářením se liší v závislosti na pozorovateli. Jedna z nejdůležitějších vlastností světla je jeho rychlost šíření ve vakuu  $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Toto je jeden z hlavních důvodů proč se světlo používá jako médium pro šíření informací na dlouhé vzdálenosti. Při šíření libovolnou látkou jinou, než vakuum je rychlost světla menší než  $c$ . [2]

## 1.1.3 Optické prostředí

Látku, kterou se světlo šíří označujeme jako optické prostředí. Ze základních druhů optického prostředí rozlišujeme průhledné, kterým světlo prochází nezměněno. Průsvitné, kde dochází k rozptylu světla. A neprůhledné, které světlo odrazí nebo jej z velké části pohlcuje. Dále můžeme optické prostředí dělit na homogenní a nehomogenní. Tedy zdali se optické vlastnosti světla v celém objemu mění nebo nemění. Pokud rychlost šíření světla závisí na směru, z kterého proniklo do optického prostředí říkáme takovému prostředí anizotropní, opakem je pak prostředí izotropní. [2]

## 1.2 Jevy na rozhraní dvou prostředí

### 1.2.1 Odraz

Pokud se světlo šíří optickým prostředím a narazí na jiné optické prostředí, mohou nastat dva optické jevy. Prvním z nich je odraz. Světlo dopadne na hranici dvou optických prostředí pod úhlem  $\alpha$  a odrazí se pod úhlem  $\alpha'$ . Při odrazu platí, že  $\alpha = \alpha'$ . Tedy pokud máme pomyslnou kolmici na plochu dopadu, tak úhel, který svírá paprsek s kolmicí při dopadu, bude stejný jako úhel, který svírá paprsek s kolmicí při odrazu. Druhým je pohlcení. [2]

### 1.2.2 Lom světla

Druhým jevem je lom světla, který nastává, pokud na rozhraní nedojde k úplnému odrazu, nebo pohlcení. Při dopadu z optického prostředí  $n_1$  do optického prostředí  $n_2$  nastane lom.

Lom může nastat pod libovolným úhlem od kolmice od nula do devadesáti stupňů. Velikost tohoto lomu závisí na poměru rychlostí světla v optickém prostředí  $n_1$  a  $n_2$ . Velikost tohoto úhlu popisuje fyzikální veličina index lomu, která je definována jako podíl rychlostí světla dvou prostředí. Pro charakteristiku jednoho prostředí se používá tzv. absolutní index lomu se značkou  $n$ , který je podílem rychlosti světla ve vakuu a rychlosti světla v daném prostředí. Jelikož ve všech látkách bude světlo cestovat pomaleji než ve vakuu, tak je absolutní index lomu  $n$  menší nebo roven jedné. Zákon lomu je charakterizovaný rovnicí [2]

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = n . [2] \quad (1.1)$$

Kde  $\alpha$  značí úhel dopadu,  $\beta$  úhel lom,  $c$  je rychlost světla ve vakuu,  $v$  je rychlost světla v daném prostředí a  $n$  je index lomu. K této rovnici je ještě potřeba doplnit, že pokud přechází světlo z prostředí o menším indexu lomu tzv. opticky řidší do prostředí s větším indexem lomu tzv. opticky hustším, tak bude lom ke kolmici a tedy  $\beta < \alpha$  a naopak. Pokud tedy známe index lomu daného optického prostředí a úhel dopadu, lze jednoduše vypočítat úhel, pod kterým se paprsek bude lomit. Při přechodu z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí existuje úhel dopadu, který bude mít za následek odraz pod úhlem 90 stupňů od kolmice. Tomuto jevu se říká úplný odraz. Úhlu, při kterém pro dvě optická prostředí nastane, se říká mezní úhel. Při větším úhlu již lom nemůže v dané situaci nastat a světlo se od optického prostředí pouze odráží. [2]

## 1.3 Optická vlákna

### 1.3.1 Šíření světla optickým vláknem

Pro vysvětlení způsobu šíření optického signálu optickým vláknem se využívá metoda založená na principu geometrické optiky. Základní optické vlákno se skládá z jádra, jehož úkolem je vést světlo. Jádro je obaleno do tzv. pláště, tedy materiálu, který má nižší index lomu než jádro. Paprsek je zaveden do vlákna a šíří se jádrem. Pokud paprsek dopadne na rozhraní pláště a jádra po úhlem, který je větší jak mezní úhel, zcela se odrazí a nedochází k lomu. Na šíření informace vláknem se tedy podílejí pouze paprsky, které dopadají pod úhlem větším, než je mezní.[2]

### 1.3.2 Útlum

Světelný paprsek se vždy šíří prostředím jako soubíhavý nebo rozběžný. To si lze představit jako jednotlivé paprsky šířící se pod různým úhlem. Pokud paprsek dopadne

na rozhraní jádra a pláště pod úhlem menším, než je úhel mezní, tak dochází k lomu a paprsek se odrazí pouze částečně. Tyto paprsky se při šíření vláknem utlumují a nepodílejí se na šíření informace vláknem. Typický útlum, který je dosažitelný v křemenných vláknech se pohybuje v desetinách dB/km. [2]

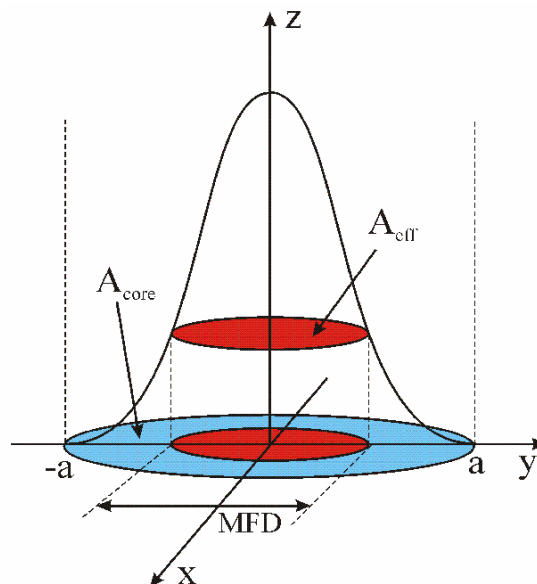
### 1.3.3 Minimální poloměr ohybu

Pokud je vlákno ohýbáno, dochází ke změně úhlů, pod kterým světlo dopadá. Některé paprsky tedy mohou překročit mezní úhel a při odrazu nedojde k absolutnímu lomu. Toto má za následek nižší počet paprsků na výstupu oproti vstupu. Prakticky to znamená změnu útlumu. Tento poloměr ohybu závisí převážně na průměru vlákna, kdy s větším průměrem vlákna stoupá i minimální poloměr ohybu. [2]

### 1.3.4 Průměr vidového pole

V anglické literatuře označováno mode field diameter. MFD je veličina, která popisuje rozložení intenzity záření světla při průchodu optickými vlákny. Mode field radius je veličina jí poloviční. Tato veličina nás zajímá především u vláken single mode, protože zde většinou zasahuje až do pláště vlákna. Intenzita záření není ve vlákně konstantní. U většiny běžných druhů vláken se rozložení intenzity dá odhadnout Gaussovým rozložením. Vrchol Gaussovy křivky bude ve středu jádra a okrajové části Gaussovy křivky mohou zasahovat až do oblasti pláště optického vlákna. Viz obr. č. 1.1. [3]

MFD definuje vzdálenost dvou bodů, ve kterých intenzita záření klesla na  $1/e^2$  hodnoty maxima. A MFR nám určuje její polovinu. [3]



Obrázek 1.1 Průměr vidového pole [17]

Rovnice popisující přibližný průměr MFD je definována

$$MFD[m] = 2a \left( 0,65 + \frac{1,619}{V^3} + \frac{2,879}{V^6} \right) [3] , \quad (1.2)$$

kde  $a$  je poloměr jádra vlákna a  $V$  je hodnota vlákna. [3]

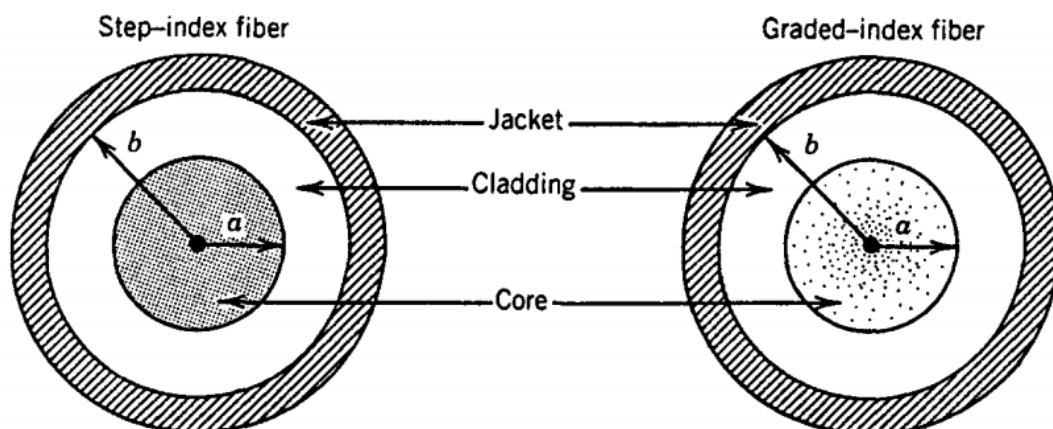
## 1.4 Druhy optických vláken

### 1.4.1 Optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu

V literatuře nazýváno step index vlákno. Jedná se o základní druh optického vlákna, u kterého nastává skoková změna indexu lomu. Je tvořeno jádrem a pláštěm. Jádro má větší index lomu než plášť. Je zde splněna podmínka pro úplný odraz, což dovolí světlu šířit se. Za určitých podmínek může plášť jádra být tvořen okolním prostředím. [4]

### 1.4.2 Optické vlákno s gradientní změnou indexu lomu

Také nazýváno graded index fiber. U tohoto vlákna nedochází ke skokové změně indexu lomu. Index lomu jádra se postupně snižuje z jeho nejvyšší hodnoty ve středu jádra až k jeho nejmenší hodnotě na okraji jádra. U většiny gradientních vláken je tento pokles téměř kvadratický. Pokud se paprsek šíří středem vlákna má kratší dráhu, ale jelikož je zde index lomu větší šíří se pomaleji. Takže oproti step index vláknu zde i paprsky s rozdílnou dráhou cestují stejnou dobu. [4]



Obrázek 1.2 Průřez step-index a graded-index vláknem [16]

### 1.4.3 Jedno vidová vlákna

Jedno vidová vlákna mají jádro o typickém průměru 5-10  $\mu\text{m}$  a plášť o průměru 125  $\mu\text{m}$ . Tomuto musí být přizpůsobena i numerická aparatura pro správné zavedení světla. Jelikož je jádro velmi malé, zvětšuje se ve vlákne úhel odrazu, což má za následek zkrácení

optické cesty. Jak název napovídá toto vlákno podporuje pouze jeden vid. [4]

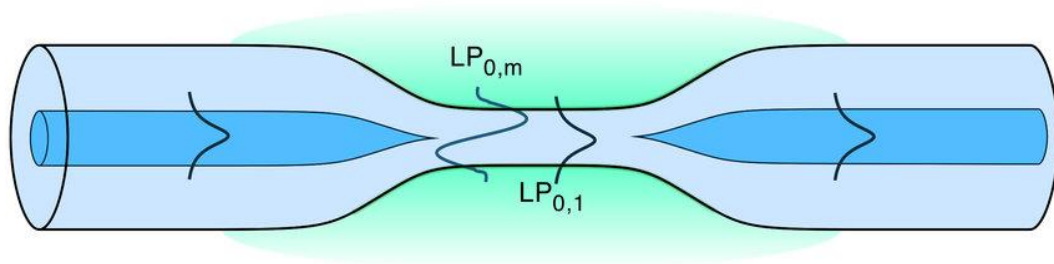
#### 1.4.4 Více vidová vlákna

Více vidová vlákna mají typický průměr jádra vlákna okolo 60  $\mu\text{m}$  a pláště 125  $\mu\text{m}$ . Oproti vláknu jedno vidovému jsou výrazně širší. Toto dovoluje šíření většího množství vidů. Díky širšímu jádru se zvětšuje počet provedených odrazů, což dovoluje větší propustnost dat. Více vidová vlákna se většinou používají na menší vzdálenost, jelikož mají větší útlum. [4]

#### 1.4.5 Tapery

Taper patří mezi pokročilé optovláknové struktury. Může být vyroben z běžného optického vlákna. Vlákno o určitém průměru je upevněno na obou koncích a ve středu nahříváno. Postupným roztahováním se vlákno prodlužuje a nahřátá část se zužuje. Části, které nejsou nahřívány si uchovávají svůj tvar. [5]

Ukázka dvojité výtaperovaného vlákna je na obr. č. 1.3.



Obrázek 1.3 Vytaperované vlákno [15]

Jedná se o velice náročný proces, který je dnes většinou vykonáván automatizovaně. Zúžené části jsou nazývány pasem taperu. Jádro taperu se při vytváření zúží ve stejném poměru, jako se zúží plášť vlákna. Pokud je průměr pasu srovnatelný s průměrem vlákna, je taper označován jako střídmý taper, který má většinou délku pasu několik mm. Střídmé tapery mohou být použity na párování dvou vláken se srovnatelným rozměrem, ale rozdílným MFD. Stejně tak lze pomocí taperu filtrovat vidy. Jelikož jsou stěny oproti středu vlákna pod úhlem, mění se maximální úhly dopadu a tapery mají oproti optickým vláknům redukovanou hodnotu vlákna. [5]

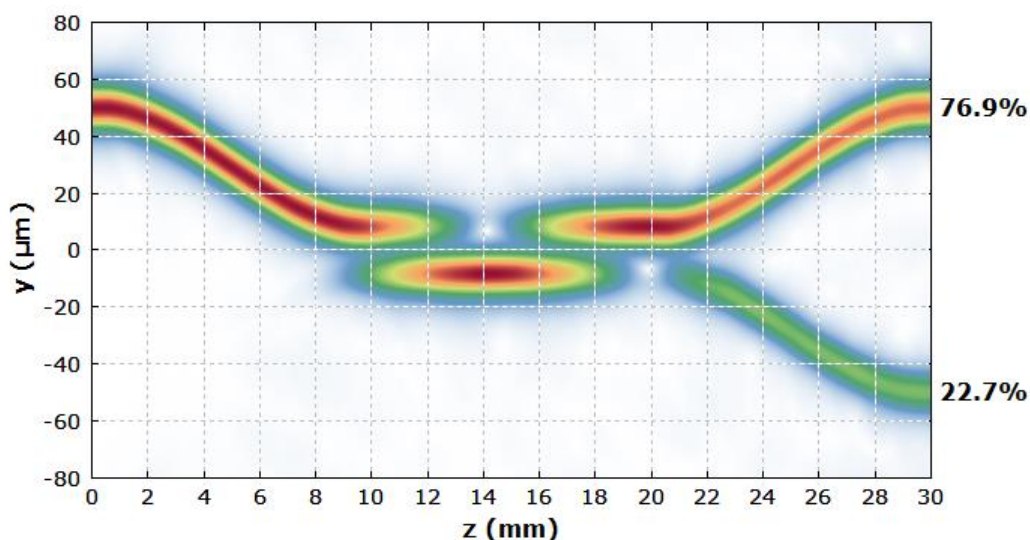
Z rovnice 1.2 je vidět, že při běžných hodnotách je velikost MFD více závislá na hodnotě vlákna než na průměru jádra. U taperu je tedy MFD větší než u vlákna o stejném průměru. A MFD je u silně vytaperovaných vláken větší, než je průměr pasu. Optická vlákna se dají taperovat i několikrát za sebou. Tím se dá docílit, že pas může mít průměr i několik mikronů. Takto silně vytaperovaná vlákna mají už zanedbatelný průměr jádra. Délka pasu a zužující se části zde musí být v řádu centimetrů. Jelikož se jádro poměrově zmenšuje stejně jako plášť dostává se na rozměry desetin mikronů. Střed vlákna u těchto



rozměrů nemá téměř žádný vliv na vedení světla a naprostá většina světla je vedena na hranici plášť-okolí. Pokud je rozšiřující se část dostatečně pozvolná, naprostá většina světla, která je vedena do taperu dokáže dostat zpět do nezúžené části a dále je vedena zase jádrem vlákna. Zde vidíme, že šíření světla v oblasti pasu je závislé na optických vlastnostech okolí. [5]

#### 1.4.6 Couplery

Couplery jsou další z pokročilých optovláknových struktur. Využívají se převážně pro navázání světla. Navazovat lze z jednoho či více vstupů do jednoho výstupu a naopak. Také mohou navazovat světlo z volného prostoru do vlákna. Couplery se vyrábí z dvou či více vytaperovaných vláken. Vlákná jsou přiložena k sobě v oblasti pasu a dochází k tepelné fúzi. Takto vznikne společná oblast v oblasti pasu. Tapery ze kterých je coupler vyráběn mají většinou delší pas než běžné tapery a to v řádech centimetrů. V případě, že z jednoho vstupu se světlo šíří do dvou výstupů, jak lze vidět na obr. č. 1.4, intenzita světla se postupně přelévá z jednoho vlákna do druhého a zpět do původního vlákna. Toto je periodický děj, proto kdyby měřený taper byl delší, dominantním výstupem by bylo druhé vlákno. Zároveň je většina couplerů pouze jednosměrných. Při použití couplerů na navázání světla do SM vlákna se využívá struktury podobající se optické čočce. Ohnisko této čočky je přímo úměrné průměru poklesu intenzity záření zdroje na  $1/e^2$  a MFD. Nepřímo úměrné je vlnové délce zdroje. Při použití správné čočky je dosaženo optimálního úhlu vstupu paprsků a tím nastane efektivní navázání paprsku ze zdroje do vlákna.[6]



Obrázek 1.4 Rozložení intenzity záření v optickém coupleru[6]

#### **1.4.7 NCF**

Z anglického no-core fiber. Ve volném překladu, vlákno bez jádra. Jedná se o speciální druh optického vlákna, které nemá jádro. Vlákno je přizpůsobeno tak, aby bylo vedení světla možné s využitím okolního optického prostředí. NCF bývá většinou navázáno na jedno vidové vlákno pro snadnější zavedení a vyvedení světla z vlákna. Ze stejné struktury vláken se také vytváří tapery u kterých je potřeba, aby jádro vlákna nerušilo vedení světla.[7]

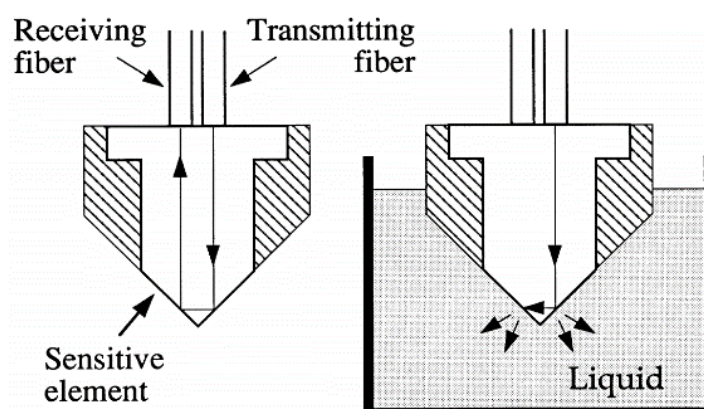
## 2. SNÍMAČE HLADINY

### 2.1 Optické snímače hladiny

Jednou z hlavních výhod optických snímačů je, že k přenosu informace využívají neelektrickou veličinu. Jejich největší využití je tedy v prostorech, které se neslučují s použitím elektřiny např. v chemickém průmyslu, při manipulaci s olejem nebo benzinem. Další výhodou je, že nemusí být magneticky odstíněny, protože vliv magnetického pole na jejich funkčnost je minimální. Hlavní rozdělení optických snímačů hladiny je na diskrétní nebo spojité. Většina vyráběných snímačů jsou diskrétní. V následující kapitole jsou popsány některé principy již používaných optických snímačů výšky hladiny. [8]

#### 2.1.1 Optický sensor výšky hladiny na principu měření intenzity záření

Skládá se ze světelného zdroje, kterým je LED produkující světlo o vlnové délce 660nm. Toto světlo je vysláno do optického vlákna, až dorazí na citlivý element viz obr 2.1. Pokud jsou splněny podmínky pro úplný odraz je světelný paprsek odražen do druhého optického vlákna, které signál zavede do vyhodnocovací jednotky. Podmínky pro úplný odraz většiny přicházejících paprsků jsou splněny za předpokladu, že prostředí, ve kterém se citlivý element nachází má nízký index lomu jako např. vzduch. Pokud má prostředí vyšší index lomu, např. voda, podmínky pro úplný odraz nejsou splněny a většina paprsků se neodrazí a disipuje v prostředí. Tato změna se projeví snížením intenzity záření přivedeného na vyhodnocovací jednotku. Umístěním toho senzoru na stěnu nádrže lze sledovat výšku hladiny. Jedná se o senzor diskrétní, jehož hlavní výhodou je jednoduchost a rychlost vyhodnocení dat. Nevýhodou je kontakt s prostředím, což limituje jeho oblast využití pro určité látky.[8]



Obrázek 2.1 Citlivý element snímače hladiny na principu měření intenzity záření[8]

### **2.1.2 Optický sensor hydrostatického tlaku**

Velikost hydrostatického tlaku vodního sloupce je přímo úměrná hustotě kapaliny, velikosti tíhového zrychlení a výšce vodního sloupce. Za předpokladu, že je hustota kapaliny konstantní, je jediná proměnná výška vodního sloupce. Pokud známe velikost plochy, na kterou hydrostatický tlak působí, je možné převést měření hydrostatického tlaku na měření působící síly. Za použití vhodného deformačního členu, převedeme měření síly na měření posunu. Optický snímač je připevněn na deformačním členu, který tvoří dno nádrže. Snímač měří prohnutí deformačního členu, které je přímo úměrné výšce vodního sloupce.[18]

Tento snímač je výjimečný tím, že nevyužívá optické vlastnosti kapaliny a žádná z optických částí nemusí být v přímém kontaktu s měřenou kapalinou. Také nám poskytuje spojitě měření výšky hladiny. Nevýhodou je jistě závislost měření na deformačním členu, který musí být zvolen přímo pro danou úlohu.[18]

### **2.1.3 Párování optických vlnodů**

Princip funkčnosti snímače je založen na podmíněném párování dvou vlnodů. Tyto vlnodody jsou dvě rovnoběžná optická vlákna. Prvním optickým vláknem je vysláno světlo. Pokud se vlákno nachází v optickém prostředí s nízkým indexem lomu je splněna podmínka pro úplný odraz. Jakmile se světlo dostane do prostředí o vyšším indexu lomu, než je nastavená hranice, podmínka pro úplný odraz není splněna a dochází k disperzi světla do prostředí mimo optické vlákno. Mezi vlnodody jsou umístěny reflektory, zajišťující odraz uniklého světla do druhého vlnododu. Tímto je dokončeno párování vlnodů. Naprostá většina světla se rozplyne již na hranici vzduch – tekutina. K párování dále v oblasti tekutiny nedochází. Takto je vytvořena optická dráha o určité délce, která je dále vyhodnocena zvolenou metodou.[10]

Tento snímač je schopen měřit s rozlišením lepším, než je 2 mm a jeho měřicí rozsah se pohybuje v řádech metrů. Jedna z nevýhod je, že snímač není funkční pro kapaliny, které nepropustí světlo.[10]

## **2.2 Ostatní snímače výšky hladiny**

### **2.2.1 Ultrazvukový snímač hladiny**

Za předpokladu, že je dosaženo konstantních podmínek v prostředí, kterým se zvuk šíří, je rychlost šíření zvuku konstantní. Hlavní vliv mají teplota a tlak prostředí. Při 20 °C a atmosférickém tlaku, je rychlost zvuku ve vzduchu 343 m/s. Princip ultrazvukového snímače vzdálenosti je založen na vyslání zvuku a změření času, za který se vyslaný zvuk odrazí od objektu. Pokud umístíme přijímač a vysílač zvuku v předem známé vzdálenosti od hladiny, můžeme tuto informaci použít pro určení změny výšky hladiny. Tento převod

je prováděn vyhodnocovací jednotkou.[19]

Největší nevýhody ultrazvukového hladinoměru jsou spojeny s šířením a odrazem zvuku. Prostředí musí být přizpůsobeno, aby se zabránilo nechtěným odrazům, které by měření znehodnotili. Ultrazvukové snímače mají rozlišovací schopnost až 1 mm a přesnost měření v řádech promile měřicího rozsahu. Měřitelný rozdíl hladiny se většinou pohybují od desítek centimetrů až pod desítky metrů.[19]

### **2.2.2 Hydrostatický snímač hladiny**

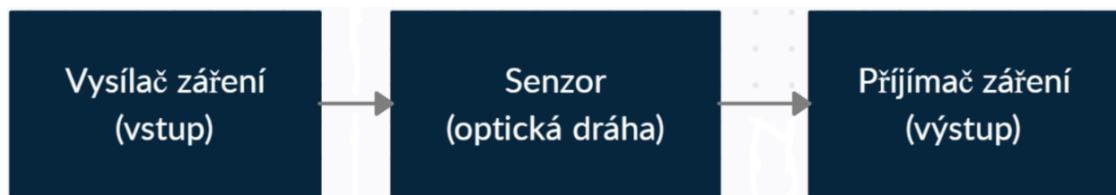
Tento druh snímačů spočívá v převedení měření výšky hladiny na měření hydrostatického tlaku. Velikost hydrostatického tlaku je přímo úměrná výšce vodního sloupce, hustotě kapaliny a tíhovému zrychlení. Tíhové zrychlení je konstantní za předpokladu, že se nemění hustota kapaliny. Výška hladiny bude přímo úměrná hydrostatickému tlaku působícímu na snímač. Tlak je většinou vyhodnocován tenzometrickým čidlem. Hydrostatické snímače jsou ideální na snímání větších hloubek, a naopak téměř nepoužitelné pro měření malých změn hladiny. [9]

Například snímač DINEL řady HLM má měřicí rozsah 100 metrů a dosahuje přesnosti v řádech desítek centimetrů. Další nevýhodou je nutná znalost hustoty měřené kapaliny a přímý kontakt snímače s měřenou kapalinou. [20]

## 3. VLASTNÍ NÁVRH OPTOVLÁKNOVÉHO SNÍMAČE HLADINY.

### 3.1 Konstrukce

Při konstrukci přístroje, který bude sloužit pro měření hladiny, je potřeba se zaměřit jak na senzor, který převádí měřenou veličinu, ale také na ostatní části nezbytné k funkčnosti přístroje. Diagram na obr. č. 3.1 nám ukazuje, jak lze přístroj rozdělit na tři hlavní části.



Obrázek 3.1 Blokový diagram návrhu optického snímače výšky hladiny

#### 3.1.1 Vysílač

Optický vysílač nám transformuje elektrický signál na optický. Existují tři základní druhy modulace signálu. Fázová, frekvenční a intenzitní modulace. Pro naše účely je nejvhodnější modulace intenzitní z důvodu její snadné realizace a měření. Nároky na dynamické vlastnosti vysílače v tento moment nejsou známy. V optických vláknech se převážně používá světlo o vlnových délkách 1550, 1300 a 850 nm. [4]

Jako vhodné řešení se jeví luminiscenční nebo laserová dioda, které dokážou poskytnout světlo o požadované vlnové délce a intenzitě záření. Do optického vlákna bude světlo navázáno pomocí vhodného coupleru.

#### 3.1.2 Přijímač

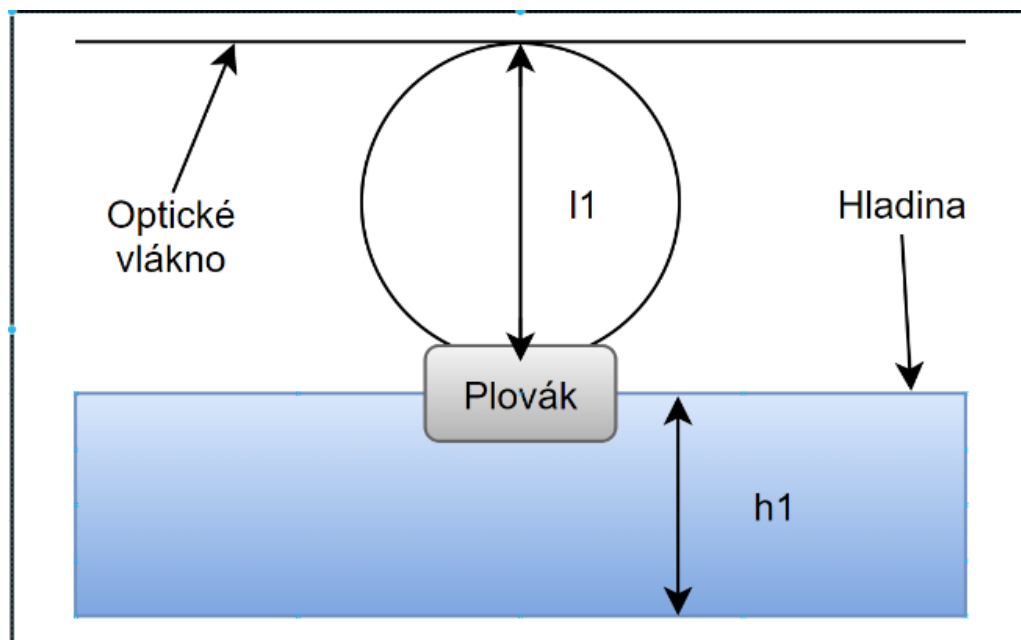
Optický přijímač nám převádí optický signál zpět na elektrický. Což nám umožní objektivně vyhodnotit změnu signálu, která proběhla po průchodu senzorem a optickou dráhou. V oblasti optických vláken jsou nejpoužívanější fotodiody typu PIN nebo lavinové. [4]

Podle požadavků na dynamické vlastnosti bude zvolen ideální druh diody. Pokud použití diody nebude vhodné bude použit jeden z dodaných měřičů intenzity.

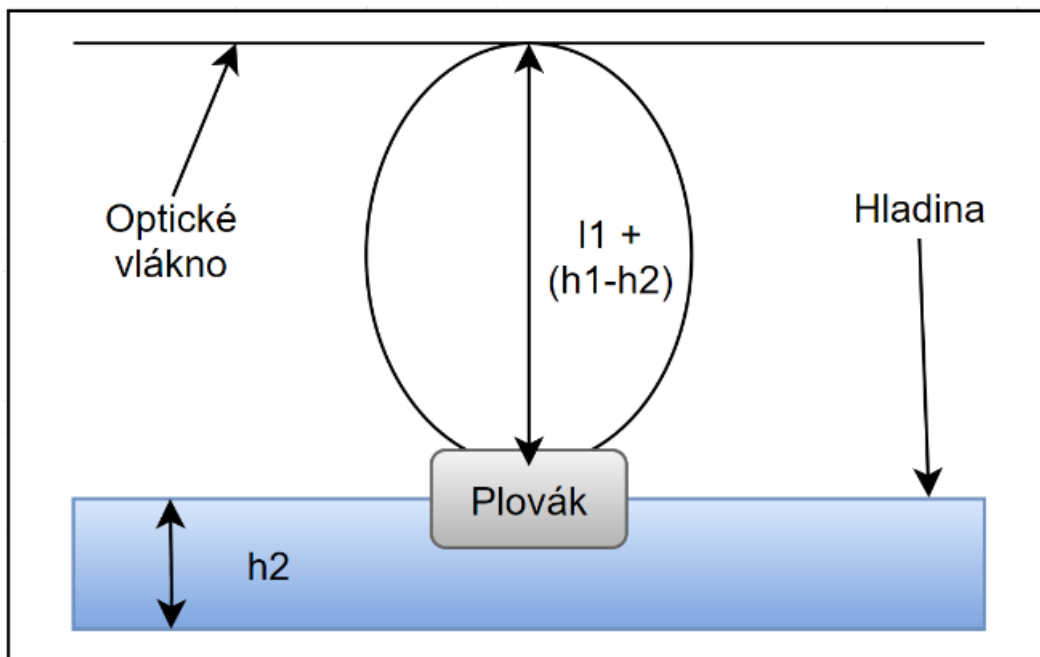
### 3.2 Snímač na principu útlumu způsobeného ohybem

Úkolem senzoru je převádět měřenou veličinu na veličinu, která je lehce měřitelná. V případě optického snímače hladiny ovlivňuje výška hladiny velikost přenesené intenzity záření. Snímač zde tedy musí využívat některého vhodného fyzikálního principu. V návrhu je využíván senzor na základě proměnného útlumu vlákna, jak bylo vysvětleno v literární rešerši. Pokud dochází k ohybu vlákna stoupá s větším poloměrem ohybu útlum vlákna. A změna útlumu vlákna se projeví na velikosti výstupní intenzity záření.[2]

Což je veličina, jejíž velikost dokážeme snadno změřit. Je tedy potřeba nalézt způsob, jak převést úlohu měření výšky na úlohu měření ohybu vlákna. Jedno z řešení by mohlo být připevnit předmět k optickému vláknu, který kopíruje výšku hladiny a v závislosti na výšce hladiny by vlákno ohýbal. Pokud klesne hladina dojde k zatížení optického vlákna, což způsobí změnu poloměru ohybu a zvýšení útlumu vlákna. Předmět použitý jako závaží musí být dostatečně těžký, aby způsobil ohyb vlákna a zároveň musí mít malou hustotu, aby se vznášel na hladině. Objem vody vytlačené ponořenou částí by neměl ovlivňovat měření. Nabízí se řešení z vlákna vytvořit kruh o určitém poloměru. Tento kruh by byl deformován závažím, což by měnilo velikost útlumu vlákna a naměřené výstupní intenzity záření. Pokud by měřená změna útlumu stále nebyla dostatečná, lze přidat počet závitů a zvýšit míru s jakou se útlum bude při změně poloměru ohybu měnit. Aby pohyb vody neovlivňovalo měření, předmět tvořící plovák bude fixován v ose kolmé na vodní hladinu. Schéma snímače je na obr. č. 3.2 a 3.3.



Obrázek 3.2 Ukázka návrhu snímače hladiny ve výchozí pozici



Obrázek 3.3 Ukázka návrhu snímače hladiny při poklesu hladiny

### 3.2.1 Aproximace elipsy

Aby šly vlastnosti snímače lépe odhadnout je potřeba popsat jak se snímací část, tedy kruh tvořený optickým vláknem, bude chovat při jeho deformaci.

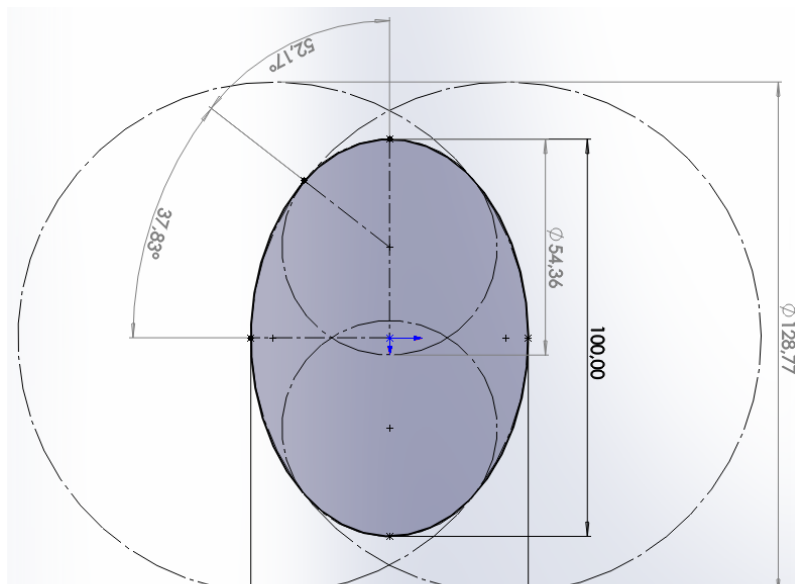
Při deformaci kruhu vznikne elipsa, která má stejný obvod jako původní nedeformovaný kruh. Tato elipsa lze složit z nekonečného počtu oblouků o různých poloměrech. Pro popsání chování elipsy lze použít jednu z aproximačních metod. Pro tento účel byla vybrána metoda aproximace čtyřmi kruhovými oblouky. Hlavní vrcholy elipsy jsou aproximovány částí vepsaných kružnic, které mají poloměr menší, než byl poloměr nedeformovaného kruhu. Vedlejší vrcholy jsou aproximovány částí opsaných kružnic, které mají poloměr větší, než je poloměr nedeformovaného kruhu. Příklad této aproximace ukazuje obr. č. 3.4. Při této aproximaci oblouky menšího a většího kruhu zabírají určitý poměr obvodu elipsy. [11]

### 3.2.2 Útlum snímače

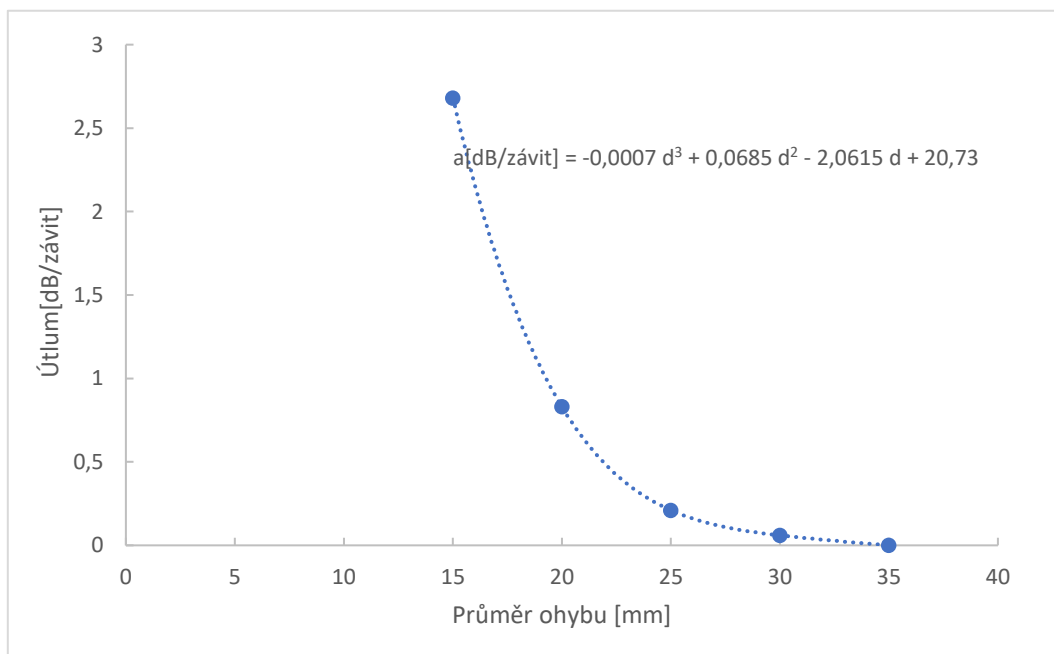
Podle poměru obvodu elipsy, které kruhy zaujímají a jejich poloměru budou kruhy přispívat k výslednému útlumu. Můžeme sčítat dílčí příspěvky útlumu. Tyto příspěvky získáme proložením grafu na obr. č. 3.5 polynomem a získáním rovnice útlumu, z toho lze vypočítat útlum jednoho závitu kružnice o libovolném průměru. Graficky je určen úhel kruhu, kterým kruh přispívá na aproximaci elipsy. Tento úhel odpovídá poměrné části kružnice. A ve stejném poměru bude i příspěvek útlumu jednotlivých kruhů. V programu Solidworks byly vytvořeny elipsy o konstantním obvodu a rozdílné



vzdáleností hlavního vrcholu elipsy od středu elipsy. Tato změna rozměrů odpovídá změně rozměrů snímače při zvýšení či snížení hladiny. Graficky byly změřeny potřebné údaje a zapsány do tabulek č. 3.1 a 3.2. Dále byl graf na obr. č. 3.5 proložen polynomem a byla získána rovnice závislosti útlumu vlákna na poloměru vytvořeného závitů viz. rovnice 3.1 . Z těchto dat již lze vypočítat útlum deformované elipsy.



Obrázek 3.4 Aproximace elipsy čtyřmi kruhovými oblouky



Obrázek 3.5 Graf naměřené závislosti útlumu optického vlákna na průměru zahnutí závitů [12]

### 3.2.3 Výpočet útlumu snímače

Na obrázku č. 3.5 je graf s výsledky experimentu, který měřil změny útlumu vlákna, při různém poloměru ohnutí single mode vlákna o rozměrech 9/125 $\mu$ m a vlnové délce světla 1625 nm. Výsledky jsou proloženy polynomem. Předpis tohoto polynomu je v rovnici 3.1

$$A[\text{dB/závit}] = -0,0007 d^3 + 0,0685 d^2 - 2,0615 d + 20,73 \quad (3.1)$$

Kde A značí celkový útlum na jeden závit elipsy a d značí odchylku od nulové pozice v mm. Vypočítaný útlum snímače je platný pouze při použití stejné aparatury a průměru nezdeformovaného kruhu 30 mm.

Tabulka 3.1 Odečtené hodnoty při deformaci elipsy posun a průměr

Průměr nedeformovaného kruhu [mm]	Posun [mm]	Průměr menšího kruhu [mm]	Průměr většího kruhu [mm]
30	3,16	26,36	34,00
30	6,65	22,70	38,92
30	10,51	19,04	45,11
30	14,78	15,41	53,11
30	19,47	11,87	63,88

Tabulka 3.2 Odečtené hodnoty při deformaci elipsy úhel

posun[mm]	uhel menšího kruhu [°]	uhel většího kruhu [°]
3,16	47,13	42,87
6,65	49,51	40,49
10,51	52,17	37,83
14,78	55,18	34,82
19,47	58,63	31,37

Příklad výpočtu při posunu 3,16 mm, viz tab. 3.1 a tab. 3.2 druhý řádek. Graficky byly zjištěny hodnoty:

$$d(\text{menší}) = 26,36 \text{ mm}$$

$$d(\text{větší}) = 34,00 \text{ mm}$$

Výpočet útlumu pro závit o průměru 26,36 a 34 mm:

$$A[\text{dB/závit}] = -0,0007 d^3 + 0,0685 d^2 - 2,0615 d + 20,73$$

$$A(\text{menší}) = -0,0007(26,36)^3 + 0,0685(26,36)^2 - 2,06157 * (26,36) + 20,73c^2$$

$$A(\text{menší}) = 0,117 \text{ dB/závit}$$

$$A(\text{větší}) = 0,0387 \text{ dB/závit}$$

Výpočet dílčího útlumu:

$$\Phi(\text{menší}) = 47,13^\circ$$

$$\Phi(\text{větší}) = 42,87^\circ$$

$$\text{Dílčí útlum menšího kruhu} = (\Phi * 4/360) * A(\text{menší})$$

$$\text{Dílčí útlum menšího kruhu} = (47,13 * 4/360) * A(\text{menší})$$

$$\text{Dílčí útlum menšího kruhu} = 0,061 \text{ dB}$$

$$\text{Dílčí útlum většího kruhu} = 0,018 \text{ dB}$$

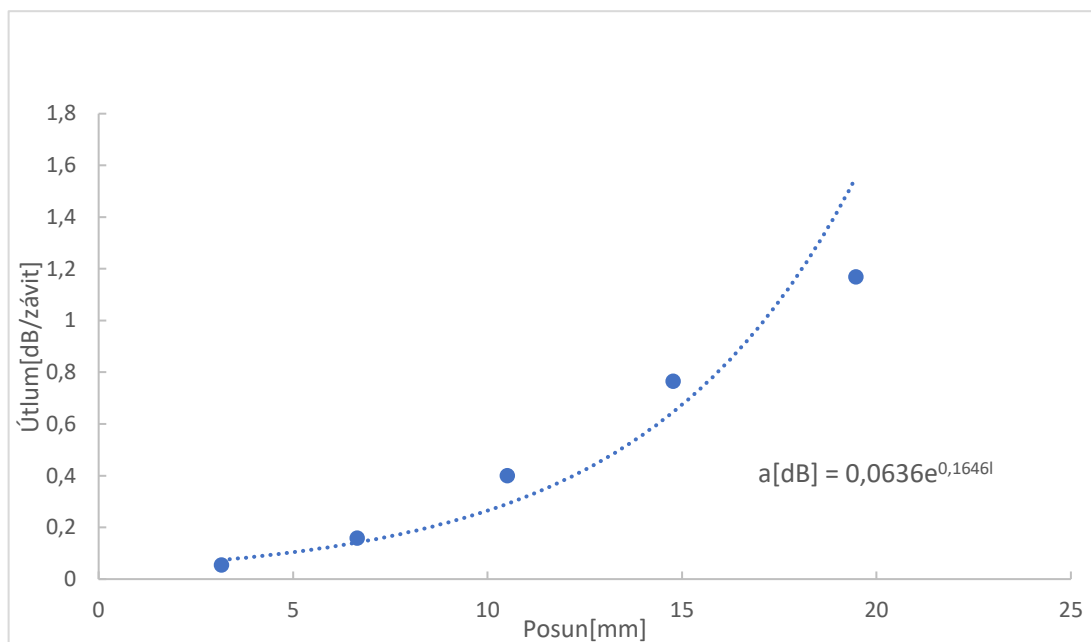
$$\text{Celkový útlum elipsy} = 0,079 \text{ dB/závit}$$

Tabulka 3.3 Výsledné hodnoty celkového útlumu elipsy pro různé posuny

posun[mm]	celkový útlum [dB/závit]
3,16	0,08
6,65	0,21
10,51	0,63
14,78	1,51
19,47	3,03

Tabulka 3.3 obsahuje všechny celkové útlumy elipsy pro různé posuny hladiny. Po proložení jednotlivých bodů exponenciálou nám vyšla rovnice 3.2, která popisuje přibližnou změnu intenzity snímače v závislosti na výšce hladiny. Z rovnice je patrné, že útlum bude exponenciálně narůstat s poklesem či zvýšením hladiny. Tvar útlumu můžeme vidět na grafu obr. 3.6.

$$a[\text{dB/závit}] = 0,039e^{0,237 l} \quad (3.2)$$



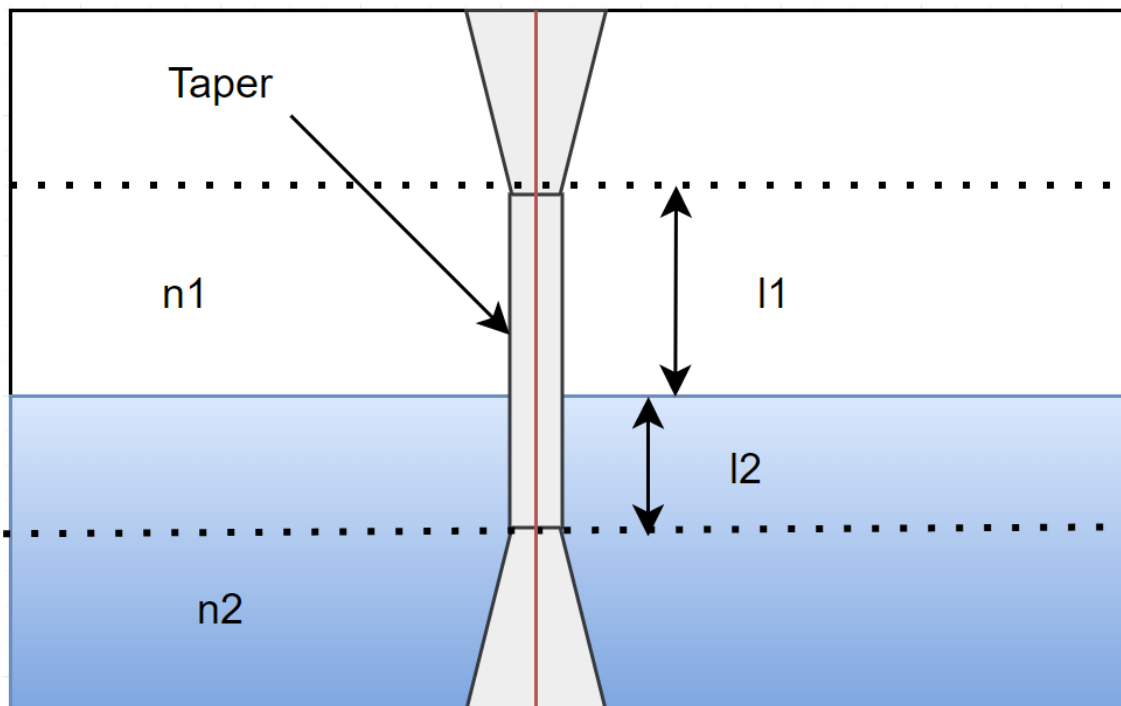
Obrázek 3.6 Graf závislosti útlumu návrhu senzoru na posunu hladiny

### 3.3 Taperové snímače

V teoretickém úvodu bylo ukázáno, že pokud se dosáhne optimálních podmínek, může MFD zasahovat až do okolí optického vlákna. Jádru při dostatečném vytaperování vlákna téměř nepřispívá k vedení světla. Světlo je vedeno jak pláštěm, tak i prostředím v kterém se optické vlákno nachází.[3]

Podle indexu lomu okolního prostředí se bude měnit útlum vlákna a s ním se bude lišit hodnota intenzity záření naměřená na výstupu taperu. Máme tedy možnost použít lehce měřitelnou veličinu, pro určení indexu lomu prostředí. Pokud bude pas vlákna zasahovat do dvou různých prostředí, budou se na vedení světla podílet ve stejném poměru jako je poměr částí pasu nacházející se v daných prostředí.

První optické prostředí představuje kapalina. Ta má index lomu  $n_1$  a pokud budeme předpokládat, že se jedná o vodu bude index lomu přibližně 1,33. Druhé optické prostředí  $n_2$  představuje vzduch, který má index lomu téměř shodný s vakuem, tedy jedna. Taper je připevněn a vzestup nebo pokles hladiny mění poměr, kterým prostředí přispívají na vedení světla. Jedna z možných podob návrhu je zobrazena na obr. č. 3.7.

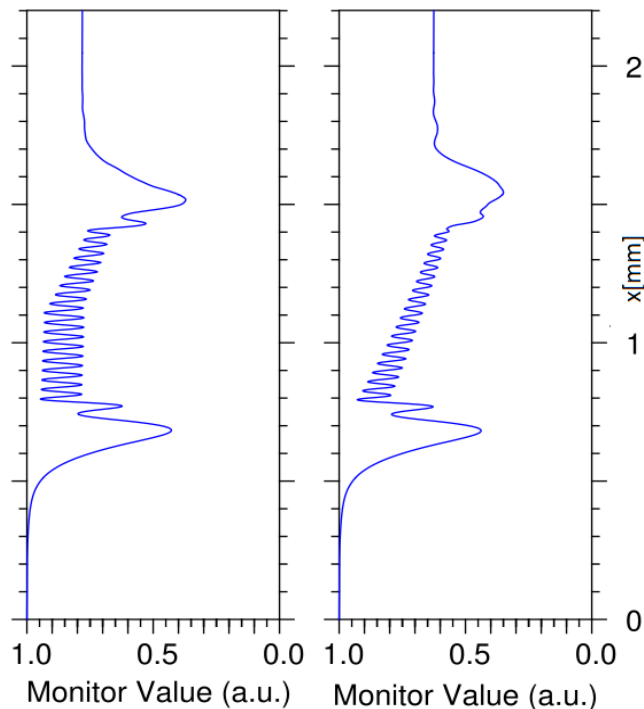


Obrázek 3.7 Návrh snímače výšky hladiny na principu proměnného indexu lomu

Princip měření indexu lomu pomocí taperu se u optovláknových snímačů používá např. pro chemickou analýzu, měření teploty, nebo na určení poměru směsi látek. U tohoto snímače bude intenzita záření naměřená na výstupu úměrná poměru ponořené ku neponořené části, a její změna je způsobena únikem světla do okolního prostředí. Kromě měření intenzity záření existuje i interferometrický způsob analýzy indexu lomu. Zde se měří fázový posun světla šířícího se snímačem ke světlu šířícím se optickým vláknem. Takto lze dosáhnout snímače s vysokou přesností a rozlišením.[13]

### 3.3.1 Intenzitní vyhodnocení

Pomocí programu BeamProp byl nasimulován průmět profilu intenzity záření do základního modu pro dvě identická vlákna s průměrem pasu 20  $\mu\text{m}$ . V simulaci bylo nastaveno, že jedno vlákno je z poloviny ponořeno ve vodě a druhé se nachází ve vzduchu. Výsledek je vidět na obr. č. 3.8. Výstupní intenzita se zvýšila u vlákna, které bylo ponořeno ve vodě. Voda je výšce odpovídající 1 l. mm vlákna. Na simulaci je vidět, že se míra jakou je světlo vyvazováno ze základního modu do okolí snižuje s přítomností vody. Z tohoto vyplývá, že s rostoucí hladinou kapaliny se bude zvyšovat intenzita záření naměřená na výstupu vlákna. Větší absorpce vody tedy nehraju u tohoto snímače významnou roli.[13]



Obrázek 3.8 Simulace průmětu intenzity záření pro vlákno ve vodě a ve vzduchu

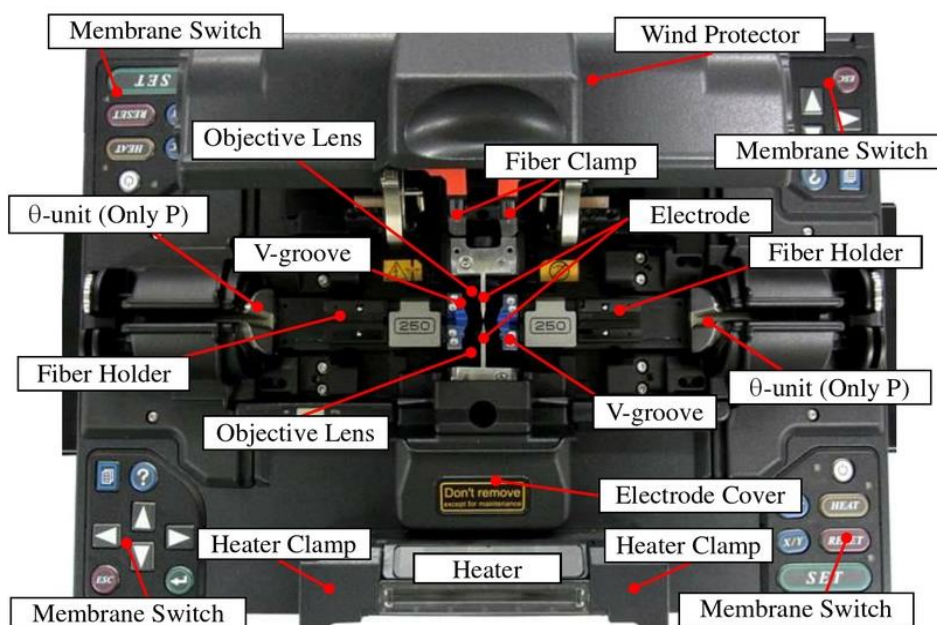
### 3.3.2 Interferometrické vyhodnocení,

Pro konstrukci interferometrického snímače bude potřeba pomocí coupleru rozpojit světlo do dvou větví. V jedné větvi dojde k fázovému posunu vlivem zpomalení světla okolní vodou s větším indexem lomu než vzduch. V druhé větvi cestuje světlo neovlivněno. Jakmile se spojí tyto větve zpět dohromady dojde k interferenci. Pokud jsou mé domněnky správné, bude se měnit výška hladiny bude se měnit také výstupní intenzita záření.

## 4. FUJIKURA FSM 100-P+

Jedná se o fúzní svářečku používanou pro práci s optickými vlákny. V anglické literatuře se nazývá fusion splicer. Tento model spliceru je rozměru běžné tiskárny na papír.

Dokáže pracovat s vlákny o průměru pláště od 60 do 500  $\mu\text{m}$  a rozměrem obalu vlákna od 100 do 2,000  $\mu\text{m}$ . Před používáním spliceru je potřeba ho nakalibrovat. Kalibrují se především parametry elektrického oblouku používaného ke svaření vláken. Kalibrace spočívá v testovacím svaření optického vlákna. Kalibrace je semi-automatická a probíhá za minimální asistence obsluhy. Po kalibraci je svářečka připravena k použití.[14]



Obrázek 4.1 Snímek svářečky Fujikura FSM 100-P series [14]

### 4.1 Vytváření svárů optických vláken

Jedna z hlavních funkcí spliceru, je spojování dvou optických vláken. Svářečka zvládá spojovat vlákna jak single mode, tak i multi mode. Běžný útlum svařeného vlákna se pohybuje okolo 0,03 dB pro single mode vlákna a 0,02 dB pro multi mode vlákna. [14]

Před začátkem svařování se z vláken odstraní obal a vlákna musí být očištěna vysokoprocenním alkoholem. Poté jsou uloženy do držáků na vlákna a zavře se záklapka sloužící jako ochrana před větrem. Je zahájen proces svařování. Svářečka si automaticky nastaví polohu vláken, uložených v tzv. V-groove svorkách. Po dosažení požadované polohy, jsou pomocí elektrického výboje vlákna svařena. [14]

## 4.2 Vytváření taperů

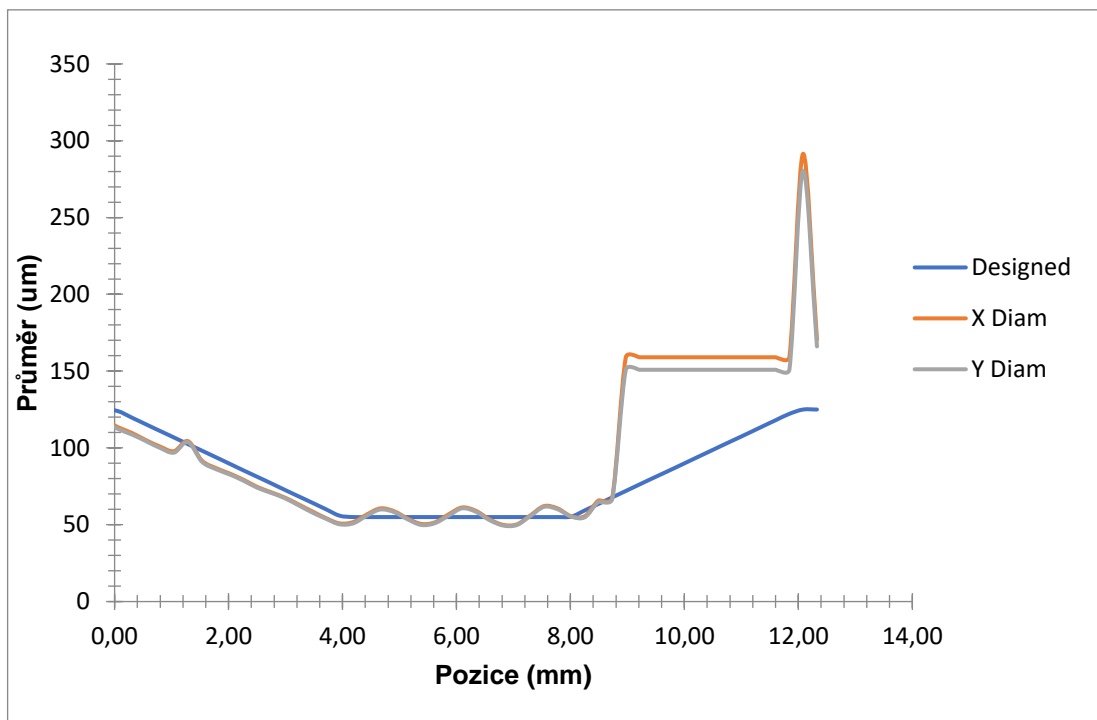
Mezi další funkce spliceru patří vytváření taperů. Při vytváření taperu se svářečka připojí k dodanému softwaru FPS od firmy AFL, ve kterém se upřesní parametry taperu. Po nastavení požadovaných vlastností jako jsou délka zužující se části a průměru pasu se očištěné vlákno vloží do svářečky. [14]

Zařízení dokáže taperovat svařená i nesvařená vlákna. Pokud si to uživatel přeje, splicer nastaví napětí vlákna na optimální hodnotu. Vlákno je nahříváno a posunováno, dokud není dosaženo požadovaných rozměrů. [14]

Splicer dokáže také vytvořené tapery proměřit pomocí funkce measure. Čímž si lze udělat představu o přesnosti vytvořených taperů. Program je schopný exportovat rozměry vytvořeného taperu.

### 4.2.1 Nastavení taperu

Vytváření taperovaných vláken není vždy úspěšné. Při nevhodném nastavení parametrů může dojít k přetržení vytvořeného taperu. Cíl byl vytvořit taper s co nejužším pasem. A tomuto musí být přizpůsobeny ostatní parametry. K co nejideálnějšímu nastavení spliceru se přibližovalo postupným experimentováním a úpravou parametrů. V grafu na obrázku č. 4.2 je vidět jak vypadá neúspěšně dokončené vlákno.



Obrázek 4.2 Graf výstupu funkce measure pro přetrhlé vlákno



#### 4.2.2 Geometrické rozměry

Ze začátku byly nastavovány převážně geometrické rozměry taperu. Ostatní parametry jsou nastaveny na výchozí hodnoty. Bylo zjištěno, že nastavení délky pasu není něco, co by ovlivňovalo úspěšnost dokončení taperu. Naopak parametr, který měl na úsěšnost vliv, je délka zúžené části. Ideální délka zúžené části se odvíjí od požadovaného průměru pasu a tloušťky použitého vlákna. Zde byl cíl, aby úhel, který svírá plášť taperu s osou vlákna byl přibližně  $0,6^\circ$ . Což pro požadovanou tloušťku  $70\ \mu\text{m}$  odpovídá délce zúžené části přibližně 3 mm.

Tento úhel byl experimentálně vyvozen na základě informací v tabulce č. 4.1. Zvětšování tohoto úhlu vedlo ke zvýšení četnosti přetrhnutých taperů. Snižování tohoto úhlu nevedlo ke změně úspěšnosti a pouze prodlužovalo dobu vytváření vlákna.

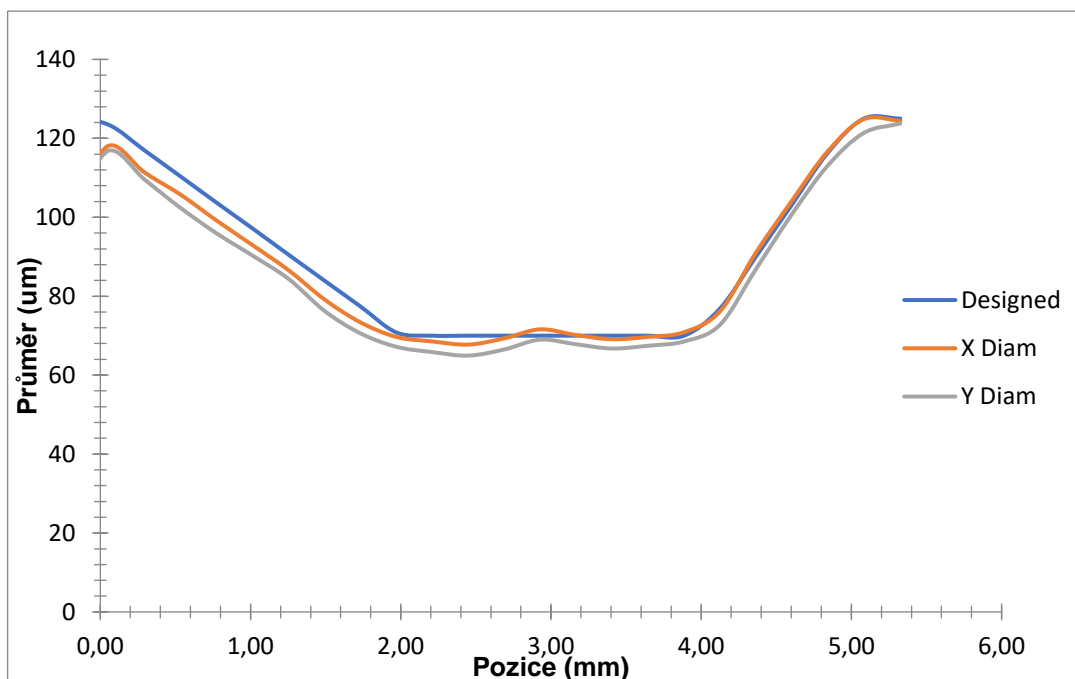
Tabulka 4.1 Výsledky dokončení taperu pro různá nastavení

délka zúžené části [mm]	požadovaný průměr pasu [ $\mu\text{m}$ ]	průměr vlákna [ $\mu\text{m}$ ]	vlákno přetrženo
2	70	125	ano
3	70	125	ne
4	70	125	ne
5	70	125	ne
6	70	125	ne

Úprava geometrických rozměrů vlákna měla největší vliv na úspěšnost procesu. S úpravou pouze rozměrových parametrů se podařilo dostat až na průměr pasu  $65\ \mu\text{m}$ . V grafu č. 4.4 lze vidět, jak vypadá vyhodnocení taperu pomocí funkce measure. A na obrázku č. 4.3 je vidět fotografie vytvořeného taperu, pořízená pomocí elektronického mikroskopu.



Obrázek 4.3 Fotografie taperu vytvořeného na svářečce Fujikura -FSM 100-P+

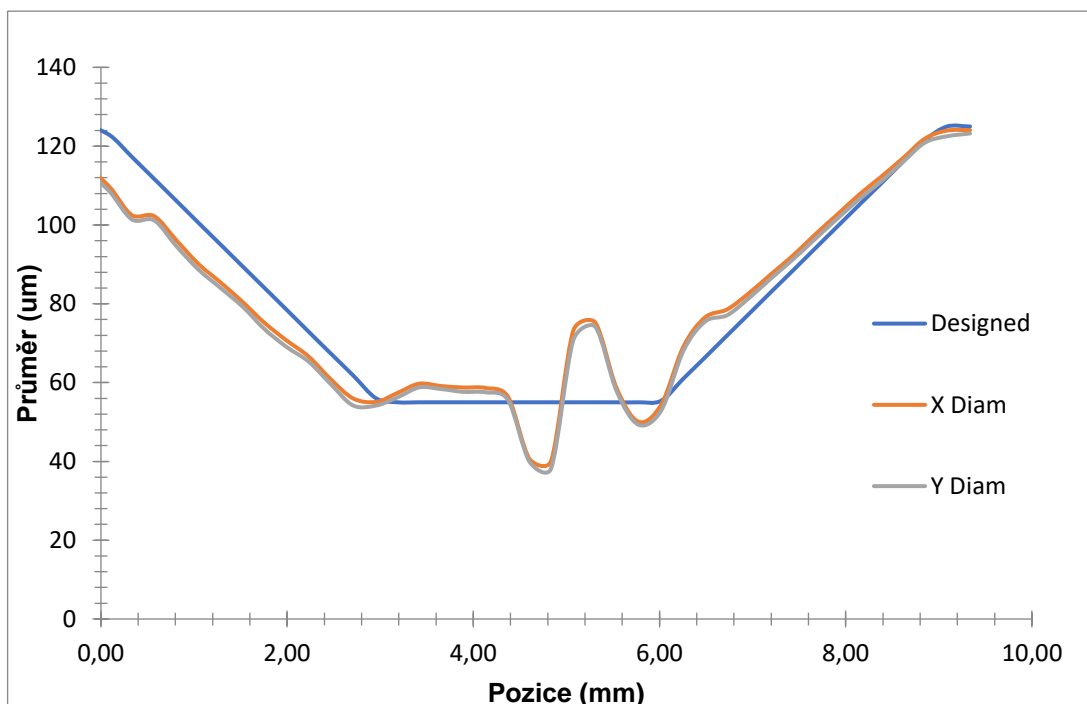


Obrázek 4.4 Graf výstup funkce measure pro vlákno o průměru pasu 70  $\mu\text{m}$

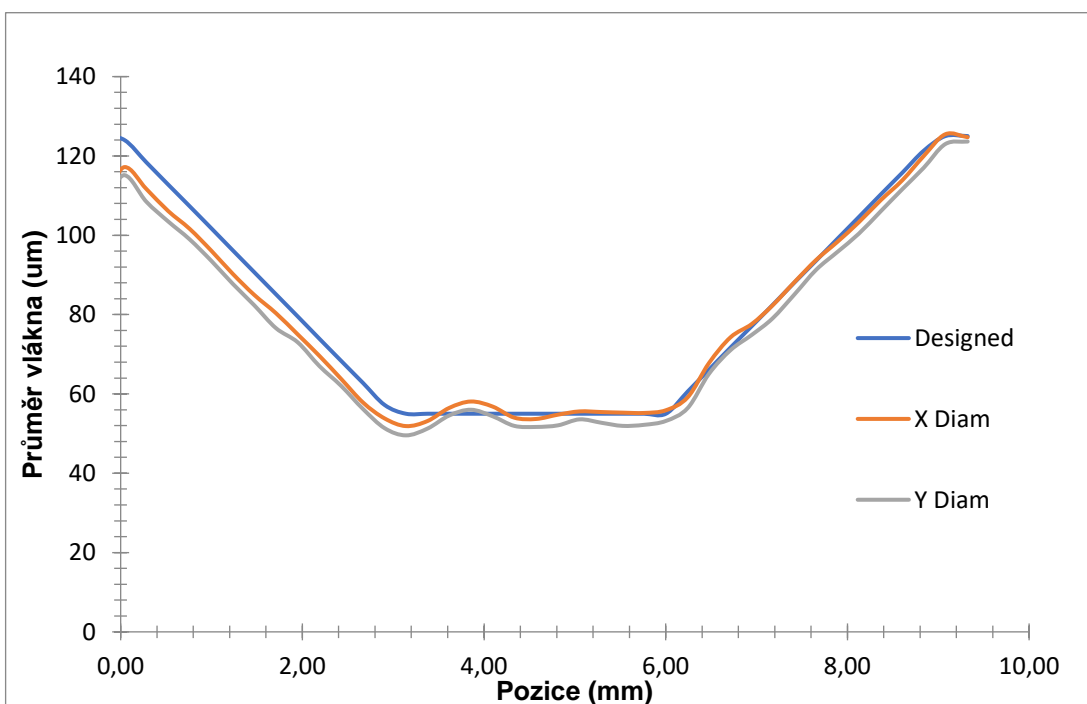
#### 4.2.3 Nastavení manipulace vlákna

Software FPS má velké množství nastavení pro průběh manipulace s vláknem při vytváření taperu. První možnost nastavení, je nastavení rychlosti pohybu vlákna při nahřívání obloukem. Dále lze zvolit, jestli bude při vytváření taperu vlákno taženo tzv. autopull, nebo bude vlákno podáváno tzv. autofeed. Lze také zvolit, aby bylo s vláknem při vytváření taperu rotováno. Žádná z těchto předešlých možností neměla vliv na úspěšnost vytvoření taperu. Jediné nastavení manipulace vlákna, které se ukázalo jako užitečné je sweep. Při zapnutí funkce sweep se využije motoru podstavce, který má větší rozsah pohybu než motory ovládající přímo svorky.

Použití funkce sweep zvýšilo úspěšnost dokončení taperu, ale na úkor přesnosti. S funkcí sweep byly konzistentně vytvářeny tapery o průměru pasu až 55  $\mu\text{m}$ . Při porovnání grafů na obr. č. 4.5 a 4.6 můžeme vyvodit, že přesnost vyrobeného taperu je s funkcí sweep výrazně horší. Vypnutí funkce sweep způsobilo, že vlákno bylo úspěšně dokončeno pouze okolo dvaceti procent případů. Tapery o průměru pasu 55  $\mu\text{m}$  byly nejužší tapery které se podařilo vyrobit.



Obrázek 4.5 Graf výstupu funkce measure při zapnutém sweepu a průměru pasu 55μm



Obrázek 4.6 Graf výstup funkce measure při vypnutém sweepu a průměru pasu 55μm

#### **4.2.4 Vícenásobné taperování**

Jak už bylo zmíněno, ve spliceru Fujikura je možné opětovně taperovat již nataperovaná vlákna. Tato možnost byla několikrát vyzkoušena s odlišnými parametry. Ani jedno vlákno, které bylo opakovaně taperováno nevydrželo proces, dokud jsem nepoužil funkce ADD WAIST POWER. Tato funkce zmenšuje sílu elektrického oblouku, kterým je taper nahříván. Nastavení této funkce na největší možnou hodnotu, tedy -170 nám dovolilo vytvářet vícenásobné a velmi tenké tapery. S tímto nastavením se podařilo dosáhnout šířky pasu 10 $\mu$ m. Profil tohoto taperu můžeme vidět na grafu č. 5.6.

## 5. KONSTRUKCE SNÍMAČŮ

### 5.1 Snímač na principu útlumu způsobeného ohybem

#### 5.1.1 Poloměr smyčky

Smyčka bude tvořena běžným single mode vláknem s rozměry 125/8 $\mu$ m. Mimo výběru vlákna, bude mít na snímací charakteristiku vliv převážně poloměr smyčky. Se zvětšujícím se poloměrem se zvětšuje rozsah měření, a naopak zmenšuje měřicí krok. Je tedy důležité najít kompromis mezi přesností a rozsahem měření. V tabulce č. 5.1 jsou naměřená data, která ukazují kdy je deformace, pro různé poloměry, smyčky zaznamenatelná měřicím přístrojem. Velikost vzdálenosti, při které zaznamenáme první změnu útlumu, je jedním z parametrů snímače.

Tabulka 5.1 Tabulka naměřených hodnot pro první měřitelnou změnu

Průměr smyčky [mm]	Posun [mm]
50	26
40	11
30	7
25	3
20	1,5
15	0,3

Z výsledků tabulky č. 5.1 je patrné, že větší poloměr smyčky nutně neposkytuje větší rozsah měření. Pro smyčku o poloměru 50 mm je více než polovina měřicího rozsahu v pásmu, které nezpůsobí žádnou měřitelnou změnu výstupní intenzity. U smyčky o průměru 15 mm je možné zaznamenat rozdíl již při 0,3 milimetrovém posunu. Je tedy faktem, že poměr měřicího rozsahu a měřicího kroku se výrazně zvětšuje s klesajícím poloměrem smyčky. Z hlediska převodních vlastností snímače je nejvýhodnější použití co nejmenší smyčky.

V potaz musí být také brána odolnost vlákna proti prasknutí. Vláknem je obaleno plastovým potahem, který zlepšuje odolnost vlákna. I přes to při přílišném a opakovaném namáhání vlákna dojde k jeho prasknutí. Při velikostech menších než je 15 mm nelze opakovaně deformovat vlákno o více, než 4 mm, aniž by se vlákno poškodilo. Pro zlepšení odolnosti snímače jsem se rozhodl pro průměr smyčky 18 mm. Tento průměr nám poskytne změnu intenzity již při posunu přibližně 0,35 mm. Zároveň je tento poloměr dostatečně velký, aby při testování nedošlo k nahodilému zničení.

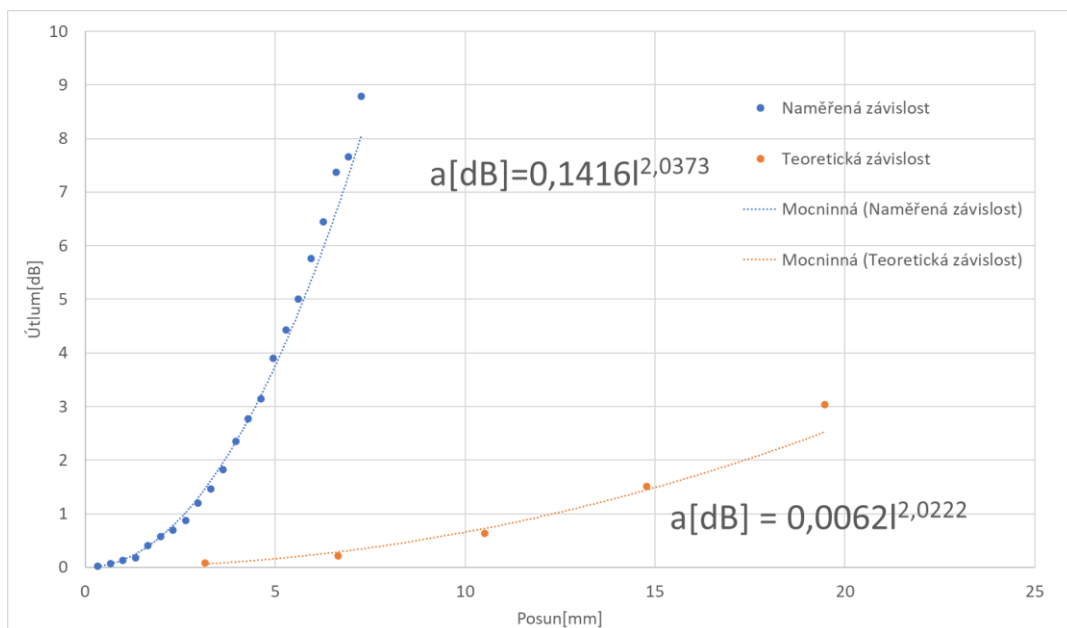
### 5.1.2 Měřicí aparatura

Kvůli nahodilému pohybu plováku po hladině je potřeba plovák zafixovat, aby se nemohl pohybovat v rovině hladiny a pohyb probíhal pouze kolmo na hladinu. Pro změření hodnot je využito plastový plovák ve tvaru krychle s hranou 5cm. K plováku je připevněna na vrchní stranu tyč, která je provlečena třemi držáky. Ty zajišťují stabilizaci. Pohyb tyče tlačí na oko smyčky a způsobuje její deformaci. Při použití menších nádob může vzniknout chyba měření, jelikož je krychle umístěna ve vodě. Měřicí nádoba měla objem větší než dva litry. Tato odchylka byla tedy zanedbána.

K měření byl poskytnut přenosný diodový zdroj světla Noyes OLS1. Tento zdroj dokáže vyprodukovat světlo o vlnové délce 850 nebo 1350 nm o výkon 0,1 mW. Jako přijímač byl použit přístroj NOYES OPM 4, který má měřicí krok v jednotkách nW. Poskytuje tedy dostatečné rozlišení pro provádění pokusů.[21]

### 5.1.3 Měření

Měření probíhalo doléváním vody do nádoby, v které byl umístěn snímač. Dolévalo se množství vody, které odpovídalo posunu hladiny o 0,33 mm. Výška hladiny, kdy se tyč dotýkala smyčky bez deformace, je referenční a odpovídá souřadnici 0mm. Rozsah měření je 0-7,26mm. Naměřená závislost je ukázána na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 Naměřené hodnoty Závislosti útlumu na posunu vodní hladiny

#### 5.1.4 Zhodnocení

Ze všech tří návrhu je tento návrh nejvíce intuitivní. Při návrhu tohoto snímače jsem předpokládal, že bude útlum exponenciálně narůstat se zvyšující se hladinou. Útlum opravdu narůstá se zvyšující se hladinou, ale závislost není exponenciální, ale mocninná a to s větší strmostí než byl odhad, rov. 5.1 ukazuje proložení této závislosti.

$$a[\text{dB}] = 0,039l^{2,037} \quad (5.1)$$

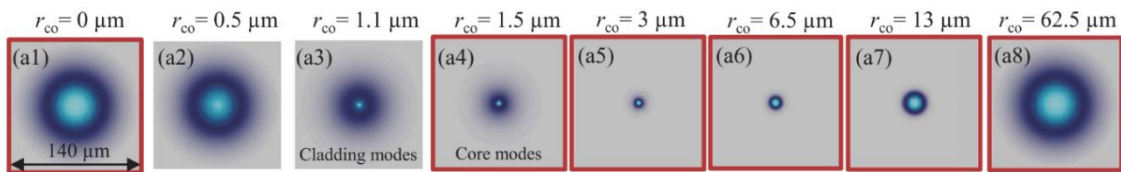
Rozdíl mezi teoretickou a naměřenou závislostí je způsoben jiným druhem deformace. Smyčka při větším posunu hladiny, než 1 mm netvořila elipsu. Tvar deformované smyčky připomínal spíše “osmičku“. Aproximace kruhovou výsečí nepopisovala skutečné chování vlákna při ohybu.

## 5.2 Intenzitní taperový snímač

### 5.2.1 Rozměry optovláknového taperu

Parametrem který bude nejvíce ovlivňovat chování tohoto snímače, bude geometrický rozměr použitého taperu. V první řadě je potřeba určit tloušťku pasu. Pas musí být dostatečně malý, aby světlo uniklo ven z vlákna do prostředí. Zde jsem prvně mířil na šířku menší než je MFD. Což je u SM optické vlákna přibližně  $8\mu\text{m}$ . Taper o tomto průměru není schopna svářečka Fujikura konzistentně vyrábět.

Při zmenšování jádra optického vlákna se MFD také zmenšuje. Tento jev pokračuje dokud není dosaženo určité hranice, kdy jádro vlákna je natolik malé, že není schopno držet módy světla. Tyto módy jsou podporovány na plášti vlákna. Čímž se ve výsledku hodota MFD zvětší. Toto chování je patrné na obr. č. 5.2. Kde  $r_{\text{co}}$  značí průměr jádra vlákna. Můžeme vidět, že při průměrech jádra vlákna menších než je  $1,5\mu\text{m}$  se začínají módy světla přesouvat z jádra do pláště vlákna, což znamená, že můžeme použít takovou tloušťku pasu, která zajistí, že jádro bude menší než  $1,5\mu\text{m}$  [21]



Obrázek 5.2 Průmět základního modu při různém průměru jádra[21]

### 5.2.2 Tloušťka pasu taperu

Při taperování se jádro optického vlákna zužuje ve stejném poměru, jako plášť. Pro dosažení tloušťky jádra  $1,5\mu\text{m}$  je potřeba vytaperovat optické vlákno  $125/8\mu\text{m}$  na tloušťku pláště  $23,45\mu\text{m}$ . Toto bylo experimentálně ověřeno.

Vytvořil jsem optické tapery s průměrem pasu  $30\mu\text{m}$  a  $20\mu\text{m}$ . Ze zdroje světla jsem do taperu, s průměrem pasu  $30\mu\text{m}$ , navázal světlo a změřil velikost intenzity světla po projití taperem. Dále jsem taper ponořil do vody a znovu změřil výstupní intenzitu záření a porovnal jsem naměřené hodnoty. Velikosti výstupních intenzit se lišili o 1%. Tato odchylka byla nejspíš způsobena chybou měření a je dostatečně malá, abychom mohli vyloučit vyvedení světla ven z taperu do okolí. Tento experiment jsem opakoval pro taper s průměrem pasu  $20\mu\text{m}$ . Zde se po ponoření taperu do vody výstupní intenzita zvětšila téměř o 30%. Jmenovité hodnoty jsou zaznamenány v tabulce č. 5.2.

Změna výstupní intenzity slouží jako důkaz toho, že tento průměr pasu je dostatečně malý pro vyvedení světla z vlákna. Pro své další pokusy jsem se rozhodl použít tapery o průměru pasu  $20,15$  a  $10\mu\text{m}$ . Tapery s menším průměrem pasu propustí do prostředí větší množství energie, ale jejich výroba je velice náročná a také mají mnohem vyšší útlum.

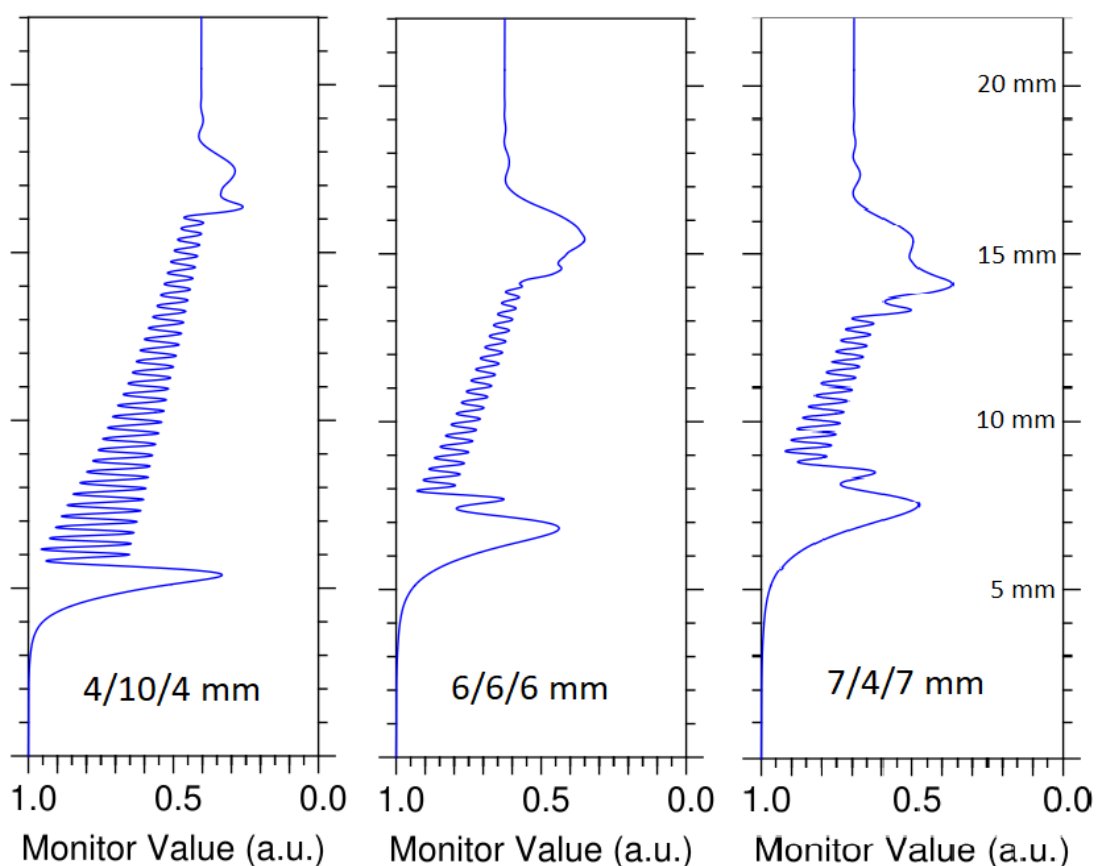


Tabulka 5.2 Tabulka naměřených hodnot pro první měřitelnou změnu útlumu

Průměr pasu [ $\mu\text{m}$ ]	I in [mW]	I out- vz [mW]	I out- vo [mW]
30	1	0,353	0,358
20	1	0,245	0,325

### 5.2.3 Poměr délek kužele a pasu taperu

Další z geometrických rozměrů vlákna, která ovlivňují naměřenou charakteristiku je poměr délek kužele a pasu taperu. Jelikož obloukové hroty svářečky Fujikura se vytvářením taperů poškozuji, pro určení požadovaných poměrů délek byl využit simulační program BeamProp, ve kterém byl nasimulován průběh výkonu základního módu vlákna pro optovláknové tapery o šířce pasu  $20\mu\text{m}$ . Simulace byly vytvořeny pro tapery 4/10/4 mm 6/6/6 mm a 7/4/7 mm. Výsledek simulací je na obr. č. 5.3.



Obrázek 5.3 Simulace průmětu intenzity záření pro různá vlákna.

Ze simulací vyplývá, že při větší strmosti kužele bude vyvázáno větší množství světla do módů pláště. Tato vlastnost je při konstrukci snímače žádoucí. Bohužel už nedochází k navázání energie zpět do vlákna a dochází k velkému útlumu, což je naopak nežádoucí. Více než polovina výkonu základního módu se ztrácí. Se zvětšující se strmostí kužele se naopak poměr navázaného výkonu zvětšuje. Zmenšuje se ale potenciální rozsah měření jelikož svářečka Fujikura nedokáže dělat tapery delší, než 18 mm. Délka kužele 6 mm poskytuje kompromis mezi rozsahem měření a potlačením útlumu. Všechny vytvořené tapery budou mít tedy poměr pasu a kužele 1:1.

#### **5.2.4 Měřicí aparatura**

Pro tuto variantu snímače jsem použil laboratorní zdroj TSL-550. Tento zdroj dokáže vyprodukovat světlo o vlnové délce 1480-1640 o výkonu -40 až 20 dBm. S nastaveným výkonem zdroje 0 dBm jsme schopni dosáhnout měřitelné výstupní intenzity záření, po projití taperem. Jako přijímač byl použit přístroj NOYES OPM 4, který byl popsán u předchozího snímače.

#### **5.2.5 Měření**

Pro manipulaci s taperem byl využit držák, do kterého byl taper přichycen. Tento držák zajišťuje bezpečnou manipulaci s taperem a zároveň fixuje taper kolmo na vodní hladinu. Držák je připevněn k nádobě, v které je postupně zvyšována vodní hladina. Výška hladiny a výstupní intenzita záření jsou měřeny a zaznamenány.

Hodnota, při absenci vody je zaznamenána jako referenční a útlum pro jednotlivé výšky hladiny je vztahován k dané referenční hodnotě, aby se zanedbal útlum způsobený samotnou soustavou.

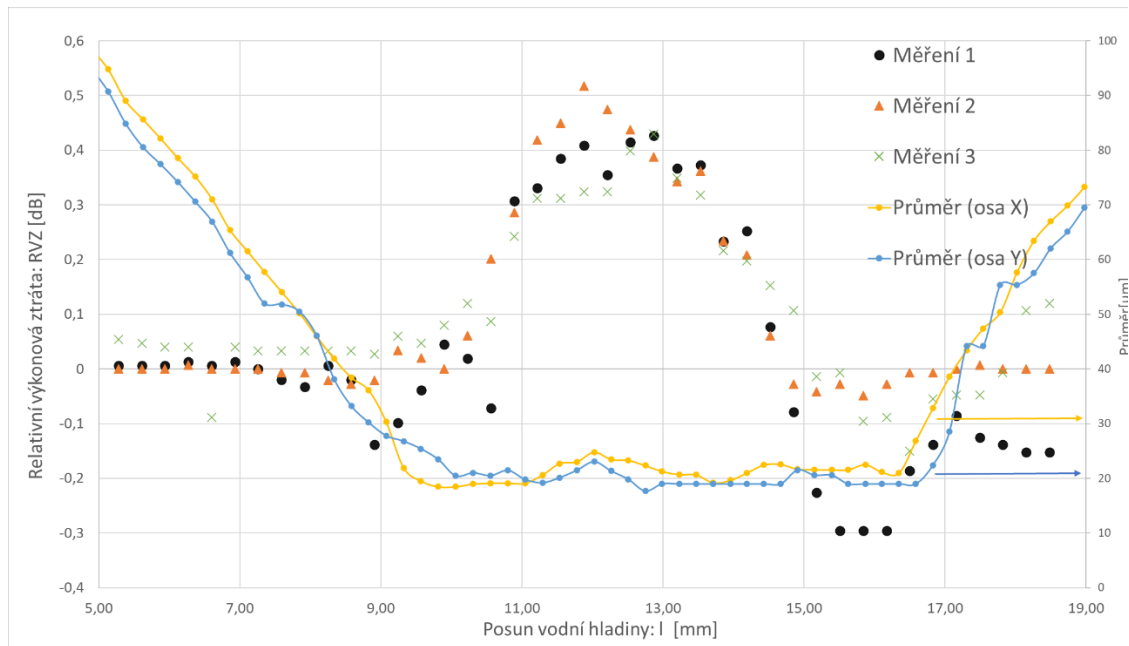
#### **5.2.6 Taper s průměrem pasu 20 $\mu$ m**

Výsledná závislost relativní výkonové ztráty na posunu vodní hladiny byla vynesena do grafu na obr. č.5.4 zároveň s rozměrovým profilem taperu naměřeným svářečkou Fujikura.

Je vidět že závislost je se zanedbáním menších odchylek neměnná, dokud voda není ve výši 9 mm od referenčního bodu. Což odpovídá prvnímu milimetru pasu taperu. Zde začíná závislost stoupat s lineárním průběhem. Toto odpovídá předpokládanému průběhu. Při výšce vody 11,4 mm nastane při posunu 0,33mm skok. Který u třetího měření byl až 0,38 dB. Aby se ověřilo, že se nejedná o chybu měření. Bylo vyzkoušeno proměření tohoto skoku s pětiovým krokem, tedy 0,066 mm. Tohoto kroku bylo dosaženo zmenšením dávkování vody na pětinu. A skutečně je mezi těmito body téměř rovnoměrný rozestup. Což dokazuje, že se nejedná o nahodilou chybu měření.

Tento prudký nárůst je skutečnou vlastností tohoto taperu. Jakmile hladina dosáhne přibližně poloviny taperu, začne závislost lineárně klesat než dosáhne přibližně hodnotu RVZ bez přítomnosti vody. Toto chování nebylo podle simulací očekáváno. Jedno

z vysvětlení může být, že u vyšších průměrů pasů není tento jev vyvazování světla tak výrazný. Maximální změna útlumu spojená se zvýšením hladiny je 0,55dB. Je tedy možné, že různé parazitní vlivy mohou mít na velikost útlumu větší dopad, než má přítomnost vodní hladiny a tím je závislost zkreslena. Tento taper má stále dvě lineární části, které by se daly použít pro konstrukci snímače, ale měřící rozsah je zkrácen na polovinu délky pasu. Tapery o tomto rozměru nejsou ideální pro účely měření výšky hladiny.

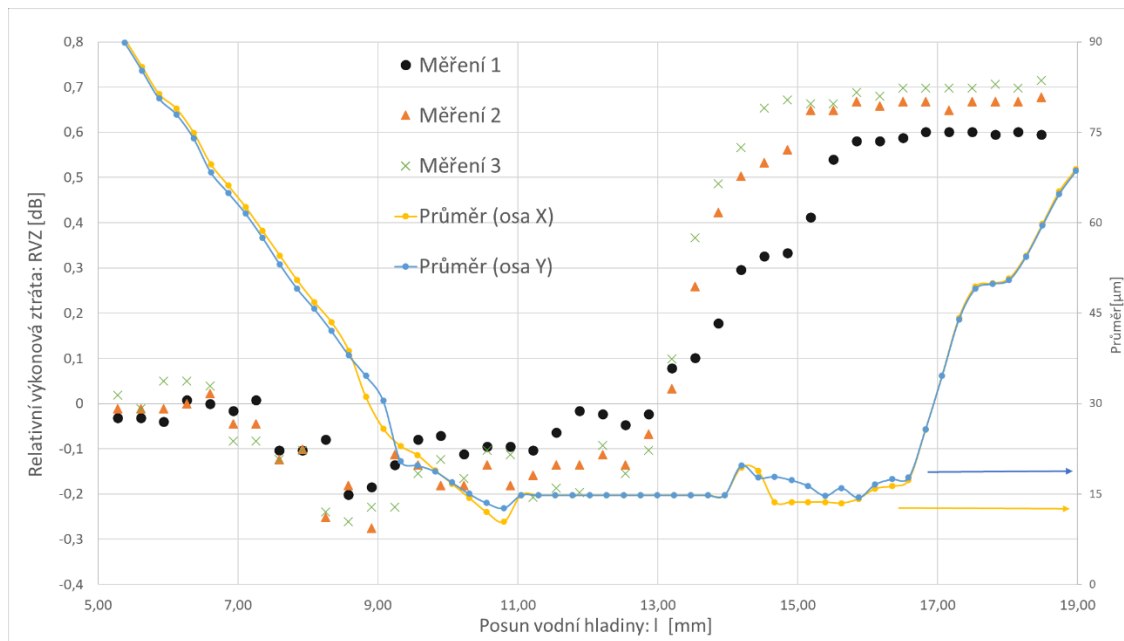


Obrázek 5.4 Graf závislosti RVZ na výšce vodní hladiny pro 20µm taper.

### 5.2.7 Taper s průměrem pasu 15 µm

Naměřenou charakteristiku můžeme vidět na grafu č. 5.5. Charakteristika taperu 15µm je oproti 20µm více podobná předpokládané charakteristice. Útlum je při zvyšování vody v oblasti kužele neměnný, dokud voda nevystoupá 1 mm od začátku pasu. Zde dojde k poklesu útlumu až na -0,27dB, a to až do oblasti začátku pasu. Toto je nejspíš znovu důsledek některého parazitního vlivu. Může se jednat například o teplotní závislost nebo nepřesnost tvaru vyrobeného taperu. V oblasti pasu 0-2 mm dochází k mírnému nárůstu charakteristiky. Tento nárůst se v oblasti 2-6 zvýší, než dosáhne maximální hodnoty útlumu, která je pro jednotlivá měření 0,71; 0,67 a 0,61.

Výsledný útlum je tedy až o 23% vyšší než u 20µm taperu. Charakteristika má dvě oblasti, které lze aproximovat lineárně s akceptovatelnou odchylkou. Což by mohlo být použito pro konstrukci optovláknového snímače.

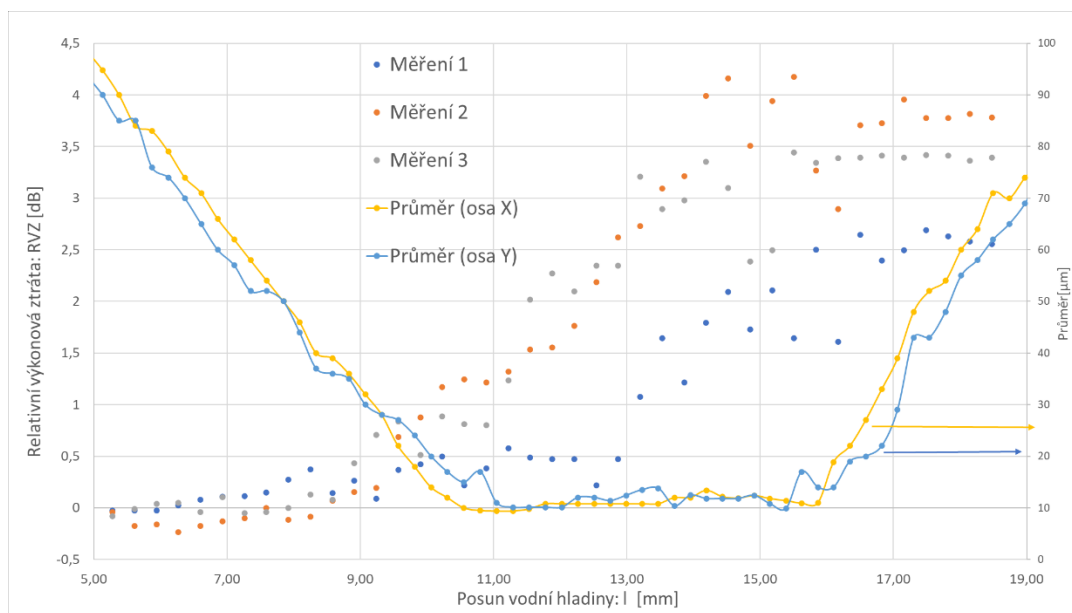


Obrázek 5.5 Graf závislosti RVZ na výšce vodní hladiny pro 15 $\mu$ m taper.

### 5.2.8 Taper s průměrem pasu 10 $\mu$ m

K tomuto měření je nutné dodat, že při referenční hodnotě hladiny, projde taperem výkon světla v jednotkách  $\mu$ W. Z tohoto důvodu je výstupní intenzita záření malá a měřené hodnoty oscilují až o 15 %.

Charakteristika je na obr. č. 5.6. Tady lze vidět, že dokud není dosaženo začátku pasu taperu, je útlum neměnný. U všech třech měření začne charakteristika lineárně stoupat na začátku pasu. A 10 $\mu$ m taper není výjimkou. Zde je lineární část charakteristiky podstatně delší než u ostatních taperů. Začíná 0,7 mm před začátkem pasu taperu, což odpovídá souřadnici 10 mm. A končí na konci pasu, tedy souřadnice 16 mm. Zde je očekávaná charakteristika velice patrná. Je vidět, že zde relativní výkonová ztráta dosahuje až 4,15 dB. Což je podstatně vyšší, než u ostatních taperů.



Obrázek 5.6 Graf závislosti RVZ na výšce vodní hladiny pro 10µm taper.

### 5.2.9 Zhodnocení

Z naměřených charakteristik je patrné, že 20µm taper není vhodný pro vytvoření spojitého snímače hladiny. Jelikož v první části pasu hodnoty stoupají a v druhé části pasu hodnoty klesají, a to se stejnou strmostí směrnice akorát s opačným znaménkem. To nám efektivně dvojnásobně zmenší použitelnou oblast snímače. Zároveň je velká část charakteristiky ovlivňována parazitními jevy, jejichž teoretický popis chování s rostoucí výškou hladiny není znám.

Taper s tloušťkou pasu 10 µm má ze všech tří nejžádánější tvar charakteristiky, a to lineární vzrůst od začátku pasu až ke konci. Ale intenzita světla se po projití taperem sníží o více než 99 %. Což dělá tento průměr pasu nevhodný k použití u snímače. Nejvhodnější chování má 15µm taper, jehož charakteristika se skládá z dvou lineárně stoupajících částí a referenční výstupní intenzita se po zapojení taperu do optické soustavy sníží přibližně na polovinu vstupní intenzity.

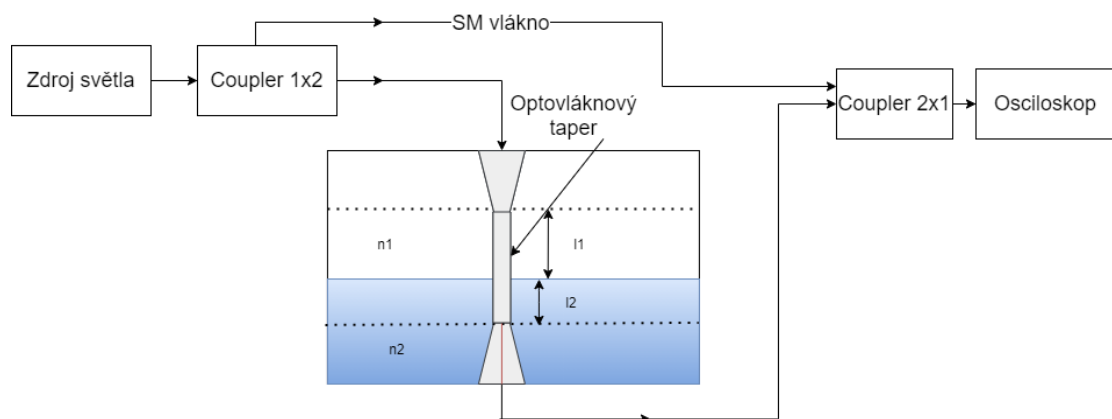
Tapery 15 a 10 µm se chovají podle odhadu ve smyslu nárůstu výstupní intenzity při zvyšování vody a ustálení se na hodnotě RVZ vyšší, než byla hodnota referenční. Taper s průměrem pasu 15 µm je nejvhodnější k provedení kalibrace.

## 5.3 Interferometrický taperový snímač

### 5.3.1 Průběh měření

Interferometrický snímač funguje na principu porovnávání fázového posunu dvou svazků světla. Světlo ze zdroje je vedeno do coupleru a následovně rovnoměrně rozděleno do dvou optických větví: větve měřicí a referenční. Větev referenční se skládá z neupraveného optického SM vlákna. Měřicí větev začíná také jako SM vlákno, na které je napojen optovláknový taper, který je ponořen v nádobě s vodou. Podle teoretického návrhu, bude světlo vyvazováno z vlákna ven a zpomalováno okolní vodou. Míra spoždění bude záviset na délce ponořené části. Po projití optickým vláknem jsou větve spojeny druhým optickým couplerem. Na výstupu coupleru je měřena intenzita záření, která se bude periodicky měnit v závislosti na délce ponořené části optovláknového taperu.

Jako zdroj světla byl zvolen diodový laboratorní zdroj TSL-500. Příjímač byl osciloskop RIGOL MSO5104 a byly použity couplery od značky safibra CP-AB 2x2 50/50 s dvěma vstupy a dvěma výstupy a CP-AB 2x1 se dvěma vstupy a jedním výstupem. U coupleru 2x2 je jedna výstupní větev nevyužita, tento coupler byl použit pouze z důvodu nedostupnosti dalšího 2x1 coupleru. V tomto případě je coupler 2x2 ekvivalentní s couplerem 2x1, jelikož coupler 2x1 je vyroben mechanickým odstraněním přebytečné větve a tím pádem také propustí pouze 50% vstupních intenzit záření. Výkon zdroje byl nastaven na 0dBm a pro převod na napětí čitelné pro osciloskop byl využit převodník DET01CFC s výstupem 0-10V a se zátěží o velikosti 600 ohmů. Byl použit totožný optovláknový taper 10 $\mu$ m jako u předchozího snímače. Viz obrázek č. 5.7.



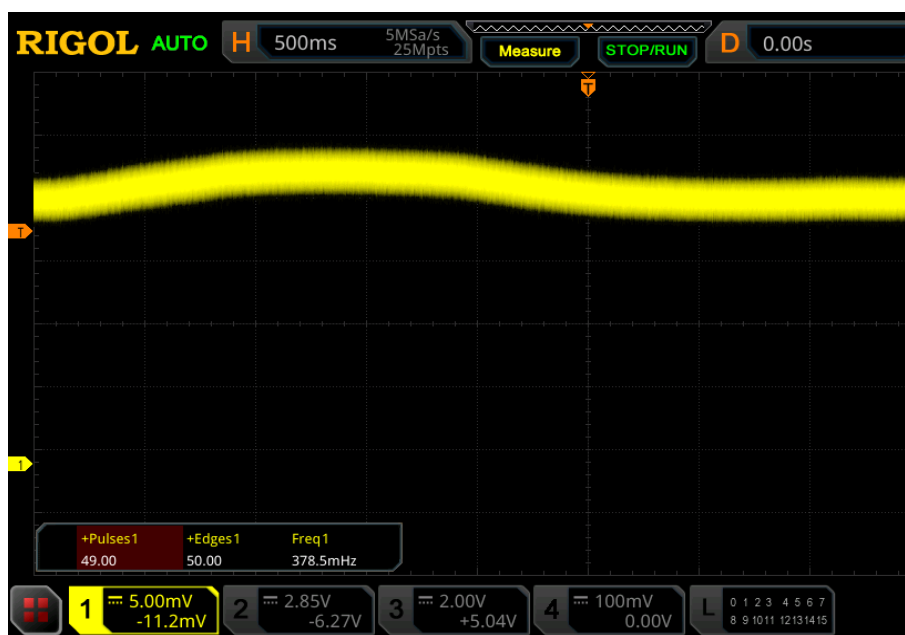
Obrázek 5.7 Schéma interferometrického snímače.

### 5.3.2 Polarizace světla

Aby vlny interferovaly s co největšími rozdíly maxima a minima. Je potřeba dosáhnout nulového odklonu polarizace dvou vln. Z diodového zdroje TSL-500 vystupuje lineárně polarizované světlo, které se v poměru 1:1 rozdělí mezi referenční a měřicí větve. Pokud není do žádné z větví zasaženo polarizátorem je na osciloskopu nenulové napětí. Je tedy patrné, že dochází ke konstruktivní interferenci světla. Po tomto jsem na referenční větev napojil polarizátor PLC-900, abych zjistil jak se bude měnit interference. Ani lineární ani tvarová polarizace neměla na výstupní průběh napětí žádný vliv. Z toho vyplývá že po průchodu couplerem není světlo lineárně polarizováno. Polarizátor je tedy v měřicí soustavě nadbytečný a nebude použit.

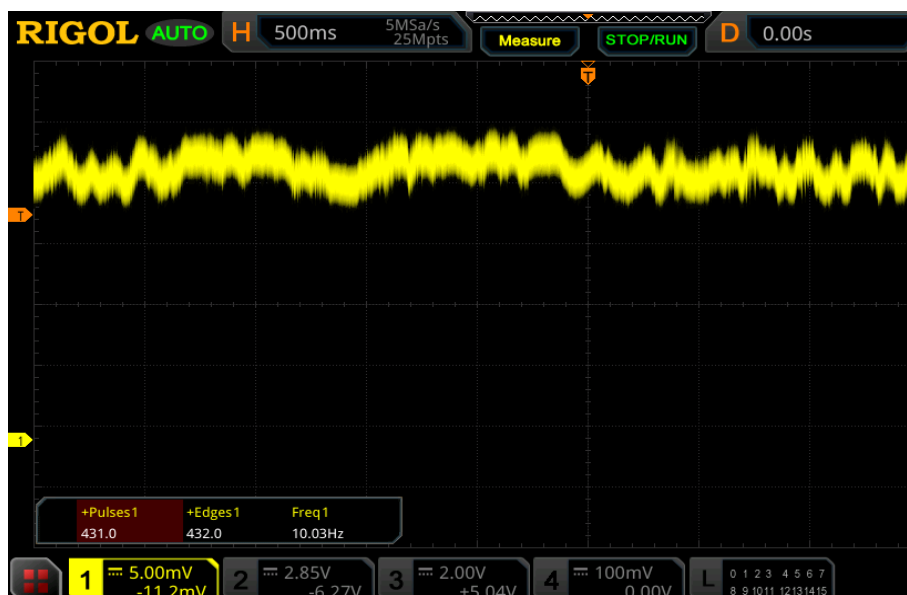
### 5.3.3 Měření

Po zapojení měřicí soustavy a zapnutí laserového zdroje se na displeji osciloskopu zobrazilo napětí sinusoidního průběhu. Snímek obrazovky osciloskopu lze vidět na obrázku č. 5.8.



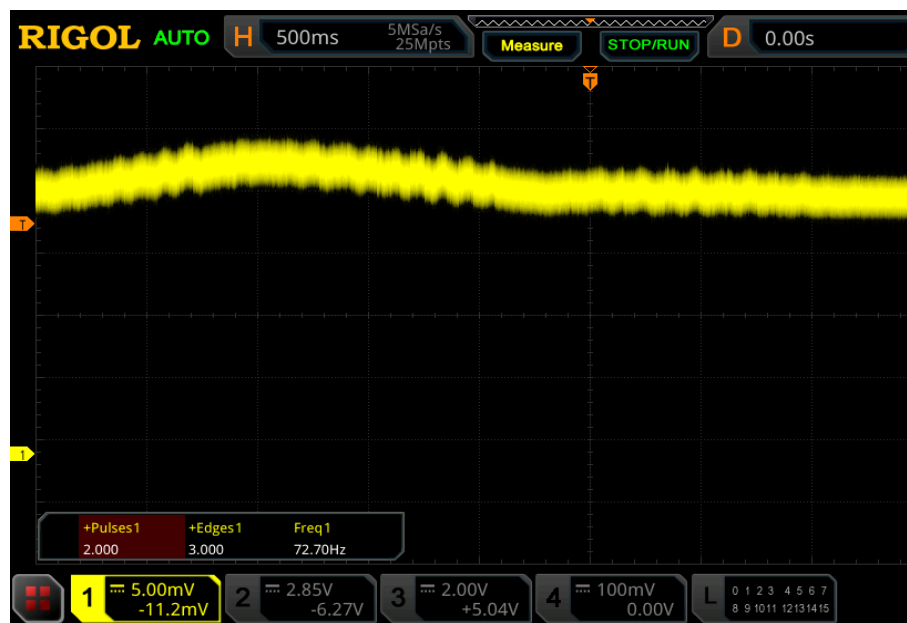
Obrázek 5.8 Snímek obrazovky osciloskopu pro nulovou hladinu

Velikost výstupního napětí je v rozsahu desítek mV a nepravidelná perioda v řádech sekund. Na signálu je patrný i relativně velký šum. Sinusoidní průběh signálu naznačuje, že dochází k neustálé změně fázového posunu mezi měřicí a referenční větví. Optovláknový taper by měl být citlivý pouze v oblasti pasu. Když byla zvyšována hladina v oblasti pasu taperu docházelo ke výchylkám v napětí viz obr. č. 5.9



Obrázek 5.9 Snímek obrazovky osciloskopu při zvyšování hladiny v oblasti pasu

Při zvyšování hladiny se velikost těchto výchylek výrazně zmenšovala viz obr. č. 5.10. Bylo potřeba se přesvědčit, zda tyto výchylky jsou způsobeny fázovým posunem, nebo pouze vibrací optovláknového taperu. Tyto výchylky bylo možné vyvolat také jakoukoliv manipulací s vláknem nebo dotknutím se stolu s aparaturou.



Obrázek 5.10 Snímek obrazovky osciloskopu při zvyšování hladiny mimo oblast pasu



Proto byla měřící větev nahrazena obyčejným single mode vláknem. Pokud byly výchylky způsobeny fázovým posunem, neměly by být při absenci taperu patrné. Na obr. č. 5.11 vidíme, že i při použití single mode vlákna docházelo k deformaci signálu.



Obrázek 5.11 Snímek obrazovky osciloskopu při zvyšování hladiny bez přítomnosti taperu

### 5.3.4 Zhodnocení

Tento druh snímače není v běžných podmínkách použitelný. Takto zapojená měřící aparatura je příliš náchylná na vnější vlivy. Hlavním problémem byly vibrace. Kde i odsunutí kancelářské židle způsobilo deformaci signálu.

Při výměně měřící větve bylo dokázáno, že rozdílné velikosti výchylek v oblasti pasu a v širších částech taperu byly způsobeny spíše mechanicky než fázovým posunem. Kde širší části taperu byly blíže k ukotvení a vibrace nebyly tak znatelné.

## 6. KALIBRACE SNÍMAČE

### 6.1.1 Výběr snímače

Jako snímač, který bude kalibrován jsem vybral intenzitní taperový snímače. Tento princip jsem vybral, jelikož v něm vidím největší potenciál z všech tří snímačů. Interferometrický snímač je v běžných podmínkách nepoužitelný a snímač na principu útlumu způsobeného ohybem je limitován rozměry smyčky.

Jak bylo ukázáno v kapitole 5 nejvhodnější průměr pasu pro účely vytvoření snímače je 15  $\mu\text{m}$ . Byl použit stejný 15 $\mu\text{m}$  jako v kapitole 5 viz obrázek č. 5.5. Oblast která bude použita je jedenáctý až patnáctý mm taperu.

### 6.1.2 Kalibrace

Jelikož je téměř nemožné dosáhnout stejných hodnot útlumu doléváním vody. Kalibrace je prováděna jako závislost útlumu na výšce hladiny. Z trojice naměřených hodnot jsem pomocí funkce STDEVP v programu Excel vypočítal standartní nejistotu typu A. Jelikož jsem nenašel informace o chybách měřících přístrojů standartní nejistota typu B je zanedbána. Pro získání rozšířené standartní nejistoty jsem použil koeficient roven dvěma. Takto získáme 95procentní jistotu, že měřená veličina bude uvnitř vymezeného intervalu. Výsledek kalibrace je vidět na obrázku č. 6.1.

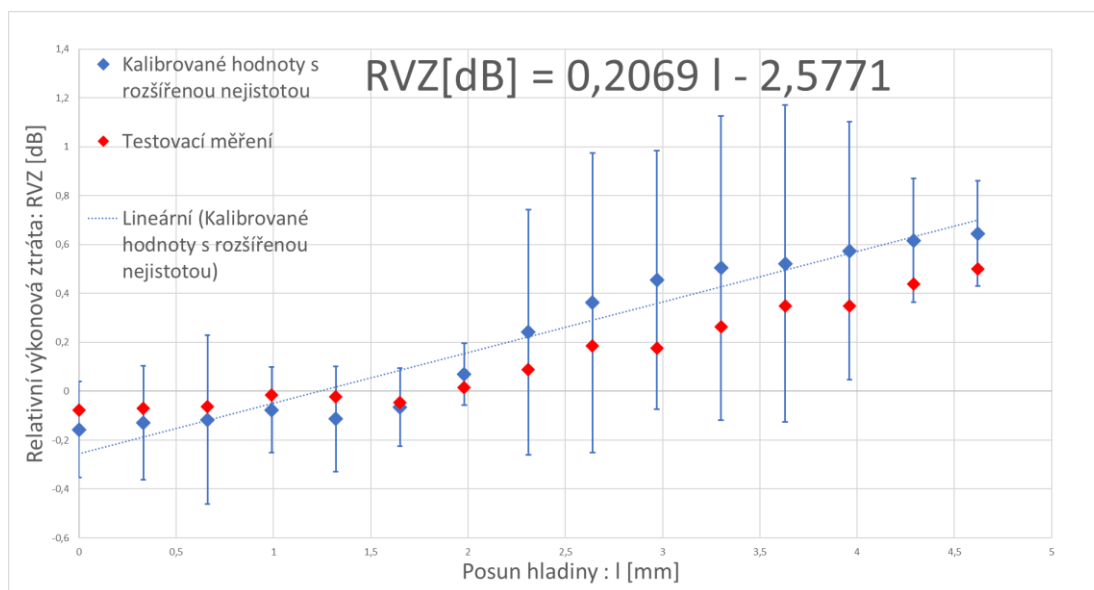
Provedl jsem testovací měření, abych ověřil kalibraci snímače. Toto měření bylo provedeno v kalibrované oblasti a krok měření byl 0,33 mm. Kvůli zvolenému koeficientu při vytváření rozšířené nejistoty má každý naměřený bod pětiprocentní šanci, že se nebude v daném intervalu nacházet. Ale jak lze vidět z grafu na obrázku č. 6.1, všech 15 naměřených bodů je uvnitř intervalu daného rozšířenou nejistotou v okolí aritmetického průměru.

Aritmetické průměry byly proloženy lineární přímkou. Ze směrnice této přímky vyplývá rovnice pro závislost relativní výkonové ztráty na posunu hladiny:

$$RVZ [\text{dB}] = 0,207 l - 2,577 \quad (6.1)$$

Pro výšku hladiny vůči začátku měření získáme vztah:

$$l [\text{mm}] = 4,834 RVZ + 12,456 \quad (6.2)$$



Obrázek 6.1 Graf závislosti relativní výkonové ztráty na posunu hladiny.

### 6.1.3 Zhodnocení

Největší chyba linearity byla 0,12 a to u desátého bodu. Což značí zvýšený rozptyl od ideálního lineárního tvaru charakteristiky. Také jde z grafu poznat, že velikosti rozšířených nejistot jsou v oblasti grafu 2,25 až 4 mm větší než u zbytku závislosti. Maximální hodnota rozšířené nejistoty je zde 0,62dB. Což je 77% celkové změny útlumu při celém měřicím rozsahu. Na první pohled je patrné, že tento konkrétní návrh se nedokáže rovnat s komerčně vyráběným snímačem. Větší množství měření a standardizace optické dráhy by při dalších pokusech jistě vedla ke zmenšení nejistoty typu A. Také omezení parazitních vlivů, jako jsou vibrace a změna teploty pomůžou zlepšit některé vlastnosti snímače.

## 7. ZÁVĚR

V práci jsem představil fyzikální principy úzce související s funkčností optických vláken, jako útlum nebo index lomu. Také jsem popsal některé pokročilé optovláknové struktury.

Dále jsem prozkoumal existující návrhy optovláknových snímačů výšky hladiny. U existujících návrhů vyzdvihnu převážně optický sensor hydrostatického tlaku, z kterého jsem si vzal inspiraci pro vytvoření jednoho z mých vlastních návrhů. Snímač na principu útlumu způsobeného ohybem, který rozebírám v třetí kapitole. U snímače jsem předpovídal, že závislost útlumu na posunu hladiny bude exponenciální s rovnicí:  $a[\text{dB/závit}] = 0,039e^{0,237l}$ . Druhý a třetí návrh se skládá z vysoce vytaperovaného vlákna, jehož pas se nachází částečně v kapalině a částečně mimo kapalinu. Předpokládal jsem, že zvýšení hladiny způsobí lineární vzrůst výstupní intenzity záření u druhého a periodickou změnu signálu u třetího návrhu.

První návrh je nejsnadněji uskutečnitelný, jelikož realizace dostatečně tenkého a dlouhého taperu není jednoduchá. Můžeme se o tom přesvědčit ve čtvrté části práce. Zde jsem prezentoval práci se svářečkou Fujikura FSM 100-P+. Snažil jsem se najít optimální nastavení pro vytvoření co nejtenčího taperu. Ukázalo se, že je důležité, aby se taper zužoval pod úhlem  $0,6^\circ$ . Nejdůležitější je nastavení funkce add waist power na co největší možnou hodnotu pro danou kalibraci. S tímto nastavením se mně podařilo vyrobit  $10\mu\text{m}$  taper.

Při praktické realizaci snímače na principu útlumu způsobeného ohybem se ukázalo, že závislost útlumu na posunu hladiny je mocninná. Po proložení této závislosti jsem získal rovnici:  $a[\text{dB}] = 0,039l^{2,037}$ . Snímač tedy měl jiný typ závislosti, než jsem předpokládal a charakteristika byla strmější. Tento jev byl nejspíš způsobeno rozdílným způsobem deformace. Měřící rozsah tohoto snímače byl  $6,7\text{ mm}$ .

U intenzitního taperového snímače jsem otestoval tapery s šířkou pasu  $20, 15$  a  $10\mu\text{m}$  a poměrem pasu a kužele  $1:1$ . Taper s pasem  $20\mu\text{m}$  byl nevhodný kvůli tvaru charakteristiky, viz obrázek č. 5.4. Patrně nebyl vliv vyvazování světla dostatečně výrazný. Taperem s šířkou pasu  $10\mu\text{m}$  prošla pouze malá část světla. Výstupní intenzita záření nabývala pouze jednotky promile intenzity vstupní, což je při konstrukci snímače nežádoucí.

Nejvhodnější byl  $15\mu\text{m}$  taper, kde se po projití taperem ztratilo pouze  $50\%$  vstupní intenzity záření. Závislost RVZ na výšce hladiny měla v oblasti pasu pětimilimetrový lineární úsek a charakteristika se chovala podle očekávání viz obrázek č. 5.5.

Interferometrický taperový snímač se ukázal jako nevhodný. Snímač byl extrémně citlivý na okolní vibrace, které se mi v běžném prostředí nepodařilo odizolovat, což mělo za následek periodický průběh výstupního signálu i bez přítomnosti vodní hladiny. Interferometrické snímání výšky hladiny je u zmíněného návrhu nevhodné, ale tento snímač by mohl najít uplatnění například při detekci vibrací nebo pohybu.

V poslední části práce jsem kalibroval mnou zvolený snímač. Zvolil jsem si intenzitní taperový snímač o šířce pasu  $15\mu\text{m}$ , jelikož v něm vidím největší potenciál z hlediska praktické využitelnosti. Po kalibraci jsem provedl testovací měření. U měření se všech 15 měřených bodů vyskytovalo v intervalu určeném kalibrací. Nutno podotknout, že rozšířená standardní nejistota měla hodnotu až  $0,62\text{dB}$ . Opakovatelnost by se dala zlepšit kontrolou optické dráhy mimo oblast taperu a rozšířením počtu měření.

Práci bych v budoucnu chtěl rozšířit, kde by se dalo více zaměřit na konkrétní typ snímače. Ideálním kandidátem by byl intenzitní taperový snímač.

## LITERATURA

- [1] WALKER, Jearl, David HALLIDAY a Robert RESNICK. Fundamentals of physics: [extended]. 10th ed. Hoboken: Wiley, c2014. ISBN 978-1-118-23072-5
- [2] Encyklopedie fyziky: Optika. Fyzika.jreichl [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/431-optika> ČSN EN ISO 80000-2:.
- [3] PASCHOTTA, Rüdiger. RP-Photonics: Mode Radius. Fyzika.jreichl [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/mode\\_radius.html](https://www.rp-photonics.com/mode_radius.html)
- [4] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-184-5.
- [5] PASCHOTTA, Rüdiger. Fiber-optic Tapers. Rp-photonics [online]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/fiber\\_optic\\_tapers.html](https://www.rp-photonics.com/fiber_optic_tapers.html)
- [6] PASCHOTTA, Rüdiger. Fiber-optic couplers. Rp-photonics [online]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/fiber\\_couplers.html](https://www.rp-photonics.com/fiber_couplers.html)
- [7] ZHAO, Yong, Jian ZHAO a Qiang ZHAO. Review of no-core optical fiber sensor and applications. Sensors and Actuators A: Physical [online]. 2020, 313 [cit. 2021-01-02]. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2020.112160
- [8] RAATIKAINEN, Pekka, Ivan KASSAMAKOV, Roumen KAKANAKOV a Mauri LUUKKALA. Fiber-optic liquid-level sensor. Sensors and Actuators A: Physical [online]. 1997, 58(2), 93-97 [cit. 2021-01-02]. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-4247(96)01396-9
- [9] VORATHIN, E., Z. M. HAFIZI, A. M. AIZZUDDIN, M. K. A. ZAINI a K. S. LIM. A Novel Temperature-Insensitive Hydrostatic Liquid-Level Sensor Using Chirped FBG. IEEE Sensors Journal [online]. 2019, 19(1), 157-162 [cit. 2021-01-03]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2018.2875532
- [10] MORRIS, J. a C. POLLOCK. A digital fiber-optic liquid level sensor. Journal of Lightwave Technology [online]. 1987, 5(7), 920-925 [cit. 2021-01-02]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.1987.1075598
- [11] ŠETMAŇUKOVÁ, Věra. Elipsa. Praha, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce RNDr. Jana Hromadová, Ph.D.
- [12] HÁJEK, Martin a Maciej KUCHARSKI. VLIV OHYBŮ NA ÚTLUM JEDNOVIDOVÉHO OPTICKÉHO VLÁKNA - VÝZNAM VLNOVÉ DÉLKY 1625 nm PRO MĚŘENÍ OPTICKÝCH TRAS. VLIV OHYBŮ NA ÚTLUM JEDNOVIDOVÉHO OPTICKÉHO VLÁKNA [online]. Praha [cit. [02.01.2021]]. Dostupné z: <http://82.113.34.95/wp-content/uploads/2017/06/vlnova-delka1625.pdf>
- [13] LÓPEZ-HIGUERA, José M., Julian D. C. JONES, Manuel LÓPEZ-AMO, et al. Tapered optical fibre sensor for detection of hydrocarbon spills in seawater [online]. In: . 2014-6-2, 91574E- [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2058667

- [14] Fujikura FSM-100P Instruction Manual. Fujikura Europe Ltd [online]. Chessington: Fujikura, 2013 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: [https://www.fujikura.co.uk/media/135882/fujikura\\_fsm-100e.pdf?iframe=true](https://www.fujikura.co.uk/media/135882/fujikura_fsm-100e.pdf?iframe=true)
- [15] KARAPETYAN, Konstantin. Optical nanofibers and spectroscopy. In: Research gate [online]. 11.5.2011 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/51916935\\_Optical\\_nanofibers\\_and\\_spectroscopy/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/51916935_Optical_nanofibers_and_spectroscopy/citation/download)
- [16] FIBER OPTICS 4 SALE. GEOMETRICAL-OPTICS DESCRIPTION OF STEP-INDEX AND GRADED-INDEX OPTICAL FIBERS. In: Fiberoptics [online]. Pleasanton, 16.3.2020 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/step-index-optical-fibers>
- [17] VOICULESCU, Emil, Christoph M. GREINER, Christoph A. WAECHTER, Mircea HOTOLEANU a Gabor CSIPKES. Improving the beam quality in LMA fibers [online]. In: . 2008-2-7, 68961J- [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: doi:10.1117/12.768780
- [18] WEISS, Jonathan D. FIBER-OPTIC LIQUID LEVEL SENSOR: liquid level sensor. Dec. 17, 1991. USA. 5,072,617. Uděleno Oct. 30, 1990. Zapsáno Dec. 17, 1991.
- [19] MOHAMMED, Saleem Latteef, Ali AL-NAJI, Mashael M. FARJO a Javaan CHAHL. Highly Accurate Water Level Measurement System Using a Microcontroller and an Ultrasonic Sensor. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2019, 518 [cit. 2021-01-03]. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/518/4/042025
- [20] Hydrostatický hladinoměr HLM–25S: datalist. *Dinel* [online]. DINEL, 4.5.2015 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: [http://www.dinel.cz/\\_file/AMIfv96PZ-5V\\_UJw8kjDQf5KIa4dQA18i8xHeFW8BpGKBMqbNGzHGiwYaUoNyxnKbfXHP1NRsRDRUo-yHoWx9wU8GpUkOADwN5Se-ZYuyo0ZLnrSDJbqMTmji7jhT5a6RjC7LAc8bxZpeDhZFhk1hO7em0RWR6xiyw/hlm-25s\\_dat\\_cz\\_n1\\_08\\_2020.pdf](http://www.dinel.cz/_file/AMIfv96PZ-5V_UJw8kjDQf5KIa4dQA18i8xHeFW8BpGKBMqbNGzHGiwYaUoNyxnKbfXHP1NRsRDRUo-yHoWx9wU8GpUkOADwN5Se-ZYuyo0ZLnrSDJbqMTmji7jhT5a6RjC7LAc8bxZpeDhZFhk1hO7em0RWR6xiyw/hlm-25s_dat_cz_n1_08_2020.pdf)
- [21] *NOYES SERIES USER MANUAL* [online]. USA, Duncan, SC 29334: BERKEY [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/manual/1378398/Noyes-.html?page=#manual>
- [22] LIAN, Xiaokang, Qiang WU, Gerald FARRELL, Changyu SHEN, Youqiao MA a Yuliya SEMENOVA. Discrete Self-Imaging in Small-Core Optical Fiber Interferometers. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2019, **37**(9), 1873-1884 [cit. 2021-5-23]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2019.2894365

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
MFD	Mode field diameter
MFR	Mode field radius
LED	Light emitting diode
FPS	Fiber processing software
RVZ	Relativní výkonová ztráta

### Symboly:

$V$	Hodnota vlákna
$a$	<i>Poloměr jádra vlákna</i>
$A$	<i>Útlum</i>
$d$	<i>Vzdálenost</i>
$c$	<i>Rychlost světla ve vakuu</i>
$v$	<i>Rychlost světla v prostředí</i>
$n$	<i>Index lomu</i>