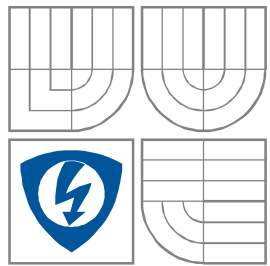


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

**MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY POMOCÍ OVS**  
MEASUREMENT OF LEVEL BY FIBER OPTIC SENSORS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

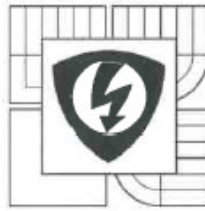
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. TOMÁŠ BEDNÁŘ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. SOŇA ŠEDIVÁ, Ph.D.**

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Kybernetika, automatizace a měření

**Student:** Bc. Tomáš Bednář

**Ročník:** 2

**ID:** 97903

**Akademický rok:** 2010/11

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření výšky hladiny pomocí OVS

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

- 1) Proveďte literární rešerši způsobů měření výšky hladiny pomocí optických vláknových snímačů.
- 2) Návrhněte přípravek (přípravky) s optickými vláknovými snímači pro kontinuální snímání výšky hladiny a dále pro max/min měření výšky hladiny, který by bylo možné využít pro výuku v laboratoři optoelektroniky.
- 3) Realizujte měřicí přípravek pro demonstraci použití různýmch principů OVS a změňte převodní charakteristiky pro jednotlivé metody měření výšky hladiny na přípravku.
- 4) Návrhněte zadání laboratorní úlohy s využitím vytvořeného přípravku pro výuku v předmětu MOES.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

ĎAĎO, S., KREIDL, M.: Sensory a měřicí obvody, Vydavatelství ČVUT, 1996, ISBN 80-01-01500-9

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 23.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

prof. Ing. Pavel Jura, 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**

Tématem této diplomové práce je problematika návrhu optických vláknových snímačů pro min/max a kontinuální snímání výšky hladiny, které by bylo možno využít pro měření v laboratoři optoelektroniky. Práce je rozdělena do tří částí, kde první část se zabývá rešerší způsobů měření výšky hladiny pomocí optických vláknových snímačů. Ve druhé části práce je proveden návrh přípravků s optickými vláknovými snímači, ukázána realizace měřících přípravků pro měření výšky hladiny a změřena převodní charakteristika vytvořeného snímače. V poslední části je navrženo zadání laboratorní úlohy s využitím vytvořeného přípravku pro výuku v předmětu *Optoelektronické snímače*.

## **Klíčová slova**

Optický vláknový snímač, optické vlákno, měření výšky hladiny, mikroohyby, mikroohybový snímač, reflexní sonda, snímač s porušením okrajových podmínek.

## **Abstract**

The subject of this master's thesis is the issue of design of fiber optic sensor for min/max and continuous measurement of liquid level, which could be used for laboratory measurement of optoelectronics. The thesis is divided into the three parts, the first part deals with methods of retrieval level measurement using fiber optic sensors. The second part is made of plant design of optical fiber sensors, it is shown the implementation of measuring devices for liquid level measurement and measured transfer characteristics of the sensors developed. The last part is proposed for laboratory typing tasks using established preparation for teaching in the subject *Optoelectronic sensors*.

## **Keywords**

Fiber optic sensor, optic fiber, measurement of liquid level, microbends, microbends sensor, reflection probe, sensor with a violation of the boundary conditions.

### **Bibliografická citace:**

BEDNÁŘ, T. *Měření výšky hladiny pomocí OVS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 79 s. Vedoucí diplomové práce byla Ing. Soňa Šedivá, Ph.D..

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření výšky hladiny pomocí OVS jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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. května 2011**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Soně Šedivé, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD</b>	<b>12</b>
1.1 Cíl práce	12
<b>2 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SNÍMAČE (OVS)</b>	<b>13</b>
2.1 Úvod	13
2.2 Optické vlnovody	15
2.3 Rozdělení a vlastnosti OVS	17
2.3.1 Amplitudové OVS	20
2.3.2 Fázové OVS	21
2.3.3 OVS polarizační a s modulací vlnové délky	21
2.4 OVS pro měření výšky hladiny	22
2.4.1 Snímače s přerušným optickým vláknem	22
2.4.2 Snímače s porušením okrajových podmínek	23
2.4.3 Reflexní sonda	25
2.4.4 Snímače založené na mikroohybech	28
<b>3 NÁVRH A REALIZACE</b>	<b>30</b>
3.1 Teorie návrhu	30
3.2 Kontinuální měření výšky hladiny	32
3.2.1 Mikroohybový OVS	32
3.2.2 Reflexní sonda	38
3.2.3 Kontinuální měření	41

<b>3.3</b>	<b>Snímač pro min/max měření výšky hladiny</b>	<b>57</b>
3.3.1	Bodové měření (min/max)	59
<b>4</b>	<b>ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY</b>	<b>60</b>
<b>4.1</b>	<b>Název – Měření výšky hladiny</b>	<b>60</b>
4.1.1	Úvod	60
4.1.2	Zadání	60
4.1.3	Použité přístroje	60
4.1.4	Blokové schéma	61
4.1.5	Teoretický rozbor	62
4.1.6	Postup měření	66
4.1.7	Závěr	67
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>68</b>
	<b>LITERATURA</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>72</b>



# Seznam obrázků

<b>Obrázek 2.1</b> Základní blokové schéma optického měřicího kanálu. [2]	<b>14</b>
<b>Obrázek 2.2</b> Typy optických vláken. [12]	<b>14</b>
<b>Obrázek 2.3</b> Optické vlákno. [10]	<b>15</b>
<b>Obrázek 2.4</b> Dvouvrstvé vlákno. [1]	<b>16</b>
<b>Obrázek 2.5</b> Dělení OVS. [1]	<b>17</b>
<b>Obrázek 2.6</b> Vlastní OVS. [8]	<b>18</b>
<b>Obrázek 2.7</b> Nevlastní OVS. [8]	<b>18</b>
<b>Obrázek 2.8</b> Obecný princip snímač s přerušným optickým vláknem s jedním detektorem. [3]	<b>22</b>
<b>Obrázek 2.9</b> Obecný princip snímač s přerušným optickým vláknem se dvěma detektory. [3]	<b>23</b>
<b>Obrázek 2.10</b> Snímač s využitím úplného odrazu na konci optického vlákna. [3]	<b>23</b>
<b>Obrázek 2.11</b> Snímač přítomnosti kapaliny s porušením okrajových podmínek. [15]	<b>24</b>
<b>Obrázek 2.12</b> Snímače s porušením okrajových podmínek od firmy Honeywell typ LLN. [13]	<b>24</b>
<b>Obrázek 2.13</b> Typy snímačů hladiny s porušením okrajových podmínek. [3]	<b>25</b>
<b>Obrázek 2.14</b> Reflexní sondy: a) jednovláknová, b) dvouvláknová. [3]	<b>26</b>
<b>Obrázek 2.15</b> Reflexní sonda se svazkem optických vláken. [14]	<b>26</b>
<b>Obrázek 2.16</b> Nejčastěji používaná uspořádání svazků. [3]	<b>27</b>
<b>Obrázek 2.17</b> Závislosti celkové výsledné relativní intenzity světla z reflexní sondy pro různá uspořádání osvětlovacích a detekčních vláken. [3]	<b>27</b>
<b>Obrázek 2.18</b> Možné realizace reflexních sond. [14]	<b>27</b>
<b>Obrázek 2.19</b> Princip snímače založeném na mikroohybech. [3]	<b>28</b>
<b>Obrázek 2.20</b> Měření výšky hladiny s tlakovým snímačem a) struktura snímače, b) konfigurace systému. [4]	<b>29</b>
<b>Obrázek 3.1</b> Kontinuální měření výšky hladiny mikroohybovým snímačem.	<b>31</b>
<b>Obrázek 3.2</b> Kontinuální měření výšky hladiny reflexní sondou.	<b>31</b>
<b>Obrázek 3.3</b> Snímač s porušením okrajových podmínek pro min/max měření.	<b>32</b>
<b>Obrázek 3.4</b> Princip mikroohybového snímače.	<b>32</b>
<b>Obrázek 3.5</b> Měřicí holé vlákno.	<b>33</b>
<b>Obrázek 3.6</b> Propojení mikroohybového snímače se zdrojem a detektorem.	<b>34</b>
<b>Obrázek 3.7</b> Měřicí destičky s deformačními prvky.	<b>34</b>
<b>Obrázek 3.8</b> Měřicí přípravek pro kontinuální měření hladiny.	<b>35</b>
<b>Obrázek 3.9</b> Ztráty optického vlákna při ohybu s poloměrem zakřivení 180 °. [6]	<b>36</b>
<b>Obrázek 3.10</b> Mikroohybový snímač výšky hladiny.	<b>36</b>
<b>Obrázek 3.11</b> Výpočet mechanické periodicity.[4]	<b>37</b>
<b>Obrázek 3.12</b> Měřicí přípravek s reflexní sondou.	<b>38</b>
<b>Obrázek 3.13</b> Uchycení sondy.	<b>39</b>

<b>Obrázek 3.14</b>	Plovák v nádobě.	<b>39</b>
<b>Obrázek 3.15</b>	Zapojení reflexní sondy se zdrojem a detektorem.	<b>40</b>
<b>Obrázek 3.16</b>	Měřicí pracoviště.	<b>41</b>
<b>Obrázek 3.17</b>	Závislost ztrát mikroohybového snímače 1 na výšce hladiny.	<b>43</b>
<b>Obrázek 3.18</b>	Závislost ztrát mikroohybového snímače 2 na výšce hladiny.	<b>44</b>
<b>Obrázek 3.19</b>	Závislost ztrát mikroohybového snímače 3 na výšce hladiny.	<b>45</b>
<b>Obrázek 3.20</b>	Závislost ztrát mikroohybového snímače 4 na výšce hladiny.	<b>46</b>
<b>Obrázek 3.21</b>	Porovnání závislostí ztrát mikroohybových snímačů na výšce hladiny.	<b>47</b>
<b>Obrázek 3.22</b>	Opakovatelnost měření s mikroohybovým snímačem 1.	<b>49</b>
<b>Obrázek 3.23</b>	Opakovatelnost měření s mikroohybovým snímačem 2.	<b>51</b>
<b>Obrázek 3.24</b>	Opakovatelnost měření s mikroohybovým snímačem 3.	<b>53</b>
<b>Obrázek 3.25</b>	Opakovatelnost měření s mikroohybovým snímačem 4.	<b>54</b>
<b>Obrázek 3.26</b>	Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny pro první měření.	<b>55</b>
<b>Obrázek 3.27</b>	Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny pro šesté měření.	<b>56</b>
<b>Obrázek 3.28</b>	Snímač Baumer FFAK 17PTD1002/L.	<b>57</b>
<b>Obrázek 3.29</b>	Zapojení snímačů měření min/max výšky hladiny.	<b>58</b>
<b>Obrázek 3.30</b>	Realizace měření min/max hladiny.	<b>58</b>
<b>Obrázek 4.1</b>	Blokové schéma pro měření 1.	<b>61</b>
<b>Obrázek 4.2</b>	Blokové schéma pro měření 2.	<b>61</b>
<b>Obrázek 4.3</b>	Základní blokové schéma optického měřicího kanálu. [2]	<b>62</b>
<b>Obrázek 4.4</b>	Dělení OVS. [1]	<b>63</b>
<b>Obrázek 4.5</b>	Snímač přítomnosti kapaliny s porušením okrajových podmínek. [15]	<b>65</b>
<b>Obrázek 4.6</b>	Reflexní sondy: a) jednovláknová, b) dvouvláknová. [3]	<b>65</b>
<b>Obrázek 4.7</b>	Princip snímače založeném na mikroohybech. [3]	<b>66</b>

# Seznam tabulek

<b>Tabulka 2.1</b> Srovnání charakteristik OV různých typů. [10]	<b>15</b>
<b>Tabulka 3.1</b> Změřené a vypočtené hodnoty pro jednotlivé mikroohybové snímače při kontinuálním měření výšky hladiny.	<b>42</b>
<b>Tabulka 3.2</b> Změřené a vypočtené hodnoty při opakovaném měření s mikroohybovým snímačem 1.	<b>48</b>
<b>Tabulka 3.3</b> Změřené a vypočtené hodnoty při opakovaném měření s mikroohybovým snímačem 2.	<b>50</b>
<b>Tabulka 3.4</b> Změřené a vypočtené hodnoty při opakovaném měření s mikroohybovým snímačem 3.	<b>52</b>
<b>Tabulka 3.5</b> Změřené a vypočtené hodnoty při opakovaném měření s mikroohybovým snímačem 4.	<b>53</b>
<b>Tabulka 3.6</b> Změřené a vypočtené hodnoty při kontinuálním měření výšky hladiny reflexní sondou pro měření 1 – 5.	<b>55</b>
<b>Tabulka 3.7</b> Změřené a vypočtené hodnoty při kontinuálním měření výšky hladiny reflexní sondou pro měření 6 – 10.	<b>56</b>

# 1 ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá problematikou měření výšky hladiny. Výška hladiny se měří z důvodu možnosti jejího regulování na určitou mez (nepřetečení nádoby, nezadření čerpadel z důvodu příliš nízké hladiny v nádobě, atd.) Měření výšky hladiny, a to jak bodové, tak i kontinuální, je v praxi často používáno. Měří se výška hladiny v nádržce na splachování WC až po výšku hladiny v obrovských nádržích na ropu s nebezpečím výbuchu. Pro měření výšky hladiny lze využít velké množství snímačů založených na různých principech (např. plovákové, kapacitní, indukčnostní, ultrazvukové či optické snímače). Částí optických snímačů jsou optické vláknové snímače (OVS), které jsou v této práci probrány podrobněji. Je zde proveden návrh a odzkoušeno měření výšky hladiny pomocí OVS (mikrohybový snímač, reflexní sonda a snímače s porušením okrajových podmínek).

## 1.1 Cíl práce

Cílem této práce je provést rešerši a seznámit se s principem optických vláknových snímačů a s jejich použitím pro měření výšky hladiny, navrhnout přípravky s optickými vláknovými snímači pro bodové (min/max) a kontinuální snímání výšky hladiny, které by bylo možno využít k měření v laboratoři optoelektroniky. Dále pak realizace měřících přípravků pro měření výšky hladiny a u přípravku pro kontinuální měření změřit jeho převodní charakteristiku a návrh vlastního zadání laboratorní úlohy s využitím vytvořeného přípravku pro výuku v předmětu *Optoelektronické snímače*.

## 2 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SNÍMAČE (OVS)

### 2.1 Úvod

Optické vláknové snímače (OVS) vznikly koncem 60. let minulého století, což v podstatě odpovídá době vzniku prvních optických vláken použitelných v praxi. Pomocí OVS lze dnes měřit v podstatě všechny fyzikální veličiny, ale i přesto u nich v minulých desetiletích nedocházelo k tak masivnímu rozšíření, které bylo z počátku předpokládáno. Hlavním důvodem menšího rozšíření proti klasickým snímačům bývala většinou vyšší cena. Toto přestává platit během posledních dvou desetiletí, kdy se výrazně zkvalitnily a rozšířily technologické postupy při výrobě optických vláken. Tyto změny umožnily běžně vyrábět speciální vlákna pro měřicí techniku (specifické profily indexu lomu vláken, Braggovy mřížky, speciální pláště vláken atd.), které mají vliv na stále častější používání optických vláken v oblasti měření. Jsou však oblasti, kde jsou OVS nenahraditelné (např. hydrofony a gyroskopy), protože ostatní snímače nedosahují v daných oblastech měření tak dobrých parametrů (vysokou citlivost, necitlivost vůči vnějšímu rušení, vysokým izolačním odporem atd.). Toto je způsobeno zcela odlišným fyzikálním charakterem nosičů informací měřené veličiny (fotony), a také z rozdílného rozsahu interakce vlnové délky optického záření s měřenou veličinou. [2], [8], [9], [11]

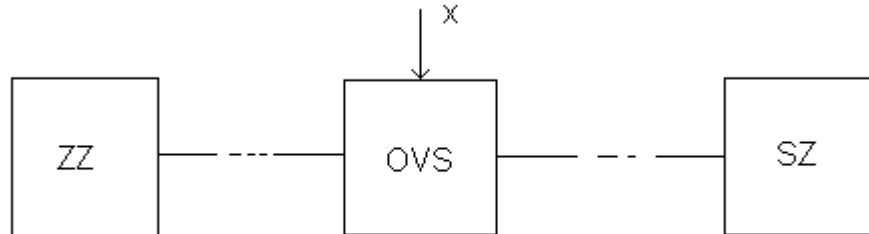
Základním principem je, že měřená fyzikální veličina  $x$  působí na OVS prostřednictvím změn indexu lomu optického vlákna  $n$ , absorpcí  $a$  nebo emisí  $e$ . [2]

Předními světovými výrobci OVS jsou např. firmy KEYENCE, Honeywell, Omega, Baumer a Mitsubishi.

Výhody OVS: [1], [2]

- vysoká citlivost
- necitlivost vůči vnějšímu rušení
- vysoký izolační odpor
- použitelnost v hořlavém a výbušném prostředí
- odolnost vůči korozi
- možnost extrémní miniaturizace
- technologická a obvodová kompatibilita

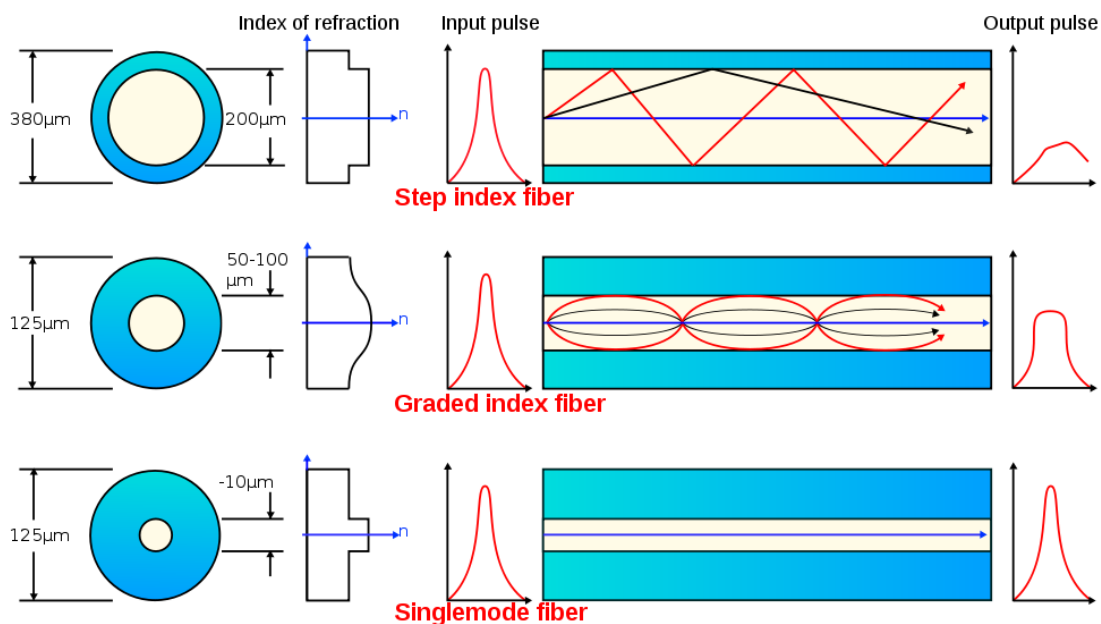
Základní blokové schéma optického měřicího kanálu, které tvoří zdroj optického záření (ZZ) - nejčastěji luminiscenční dioda (nekoherentní zdroj záření) nebo laserová dioda (koherentní zdroj záření), snímač optického záření (SZ) - nejčastěji fotodioda, PIN dioda nebo lavinová dioda a OVS, je na Obrázek 2.1. Vzájemně jsou tyto základní části propojeny optickým vláknem (Obrázek 2.2). [2]



**Obrázek 2.1** Základní blokové schéma optického měřicího kanálu. [2]

Typ OVS se volí podle druhu měřené veličiny  $x$ , způsobu modulace, metody měření a dalších nároků na měření.

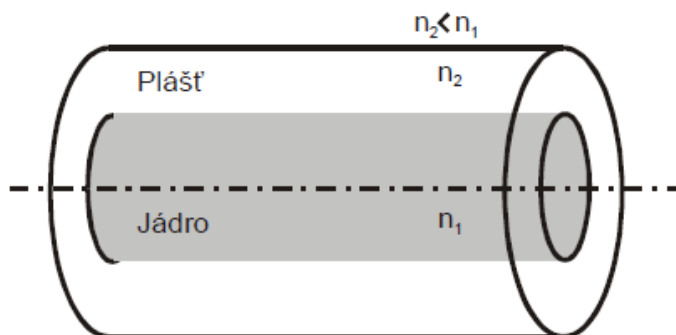
Optické vlákno se volí také s ohledem na měřenou veličinu  $x$  a dále na konkrétních požadavcích, buď telekomunikačního typu (mnohavidové se skokovou změnou indexu lomu – MM-SI, mnohavidové s gradientní změnou indexu lomu – MM-GI, jednovidové – SM, viz. Obrázek 2.2) nebo speciální pro senzorové účely. Velikost útlumu nebývá při těchto způsobech použití podstatná. [2]



**Obrázek 2.2** Typy optických vláken. [12]

## 2.2 Optické vlnovody

Optické vlnovody se dělí na planární a vláknové, kde vláknové (optické vlákna, Obrázek 2.3) se dále dělí podle materiálu na jejich výrobu na skleněné a polymerní. Podle počtu přenášených vidů na mnohovidové – MM nebo jednovidové – SM. MM vlákna se dále dělí podle změny indexu lomu na skokové – SI a gradientní – GI. SM se dělí na SI a speciální (Obrázek 2.2).



Obrázek 2.3 Optické vlákno. [10]

Při volbě materiálu optického vlákna je snahou získat kompozici, která vykazuje malé optické ztráty a malou disperzi.

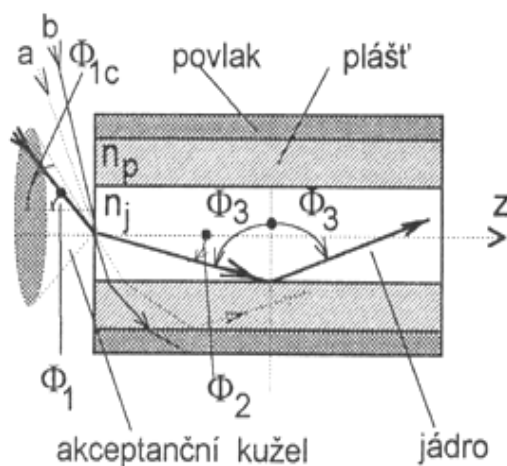
Tabulka 2.1 Srovnání charakteristik OV různých typů. [10]

Typ vlákna	Mnohovidové se skokovou změnou indexu lomu	Mnohovidové s plynulou změnou indexu lomu	Jednovidové se skokovou změnou indexu lomu
Průměr jádra [ $\mu\text{m}$ ]	50 – 450	30 – 60	3 – 10
Průměr pláště [ $\mu\text{m}$ ]	125 – 500	100 – 150	50 – 125
Průměr primární ochrany [ $\mu\text{m}$ ]	250 - 1000	250 – 1000	250 – 1000
Číselná apertura	0,15 – 0,5	0,2 – 0,3	0,08 – 0,15
Index lomu jádra	Asi 1,48	Asi 1,48	Asi 1,46
Index lomu pláště	Asi 1,45	Asi 1,46	Asi 1,456
Útlum [dB/km] při vlnové délce 0,85 $\mu\text{m}$	Méně než 5	2 – 10	2 – 5
Šířka pásma pro 1 km	6 – 25 MHz	150 MHz – 2GHz	Více jak 40 GHz

Vlnové délky a použitý materiál na výrobu optických vláken:

- 850, 1300 a 1500 nm – skla kysličíková (silikátová a germanátová)
- 4000 až 5000 nm – chalkogenní skla (na bázi selenidů a teluridů)
- 3000 až 10000 nm – halogenní skla na bázi  $\text{ZnCl}_2$  nebo  $\text{ZnF}_2$

Při šikmém dopadu světelného paprsku  $E$  pod úhlem  $\Phi$  z řidšího do hustšího prostředí s indexy lomu  $n_2 > n_1$  vzniká odražený a postupující paprsek jako výsledek lomu na rozhraní. Totální odraz nastává, je-li úhel odrazu roven  $90^\circ$ . Totální odraz je základním principem optických vláken. [1] Nejjednodušší struktura používaná pro OVS je dvouvrstvé vlákno (Obrázek 2.4).



**Obrázek 2.4** Dvouvrstvé vlákno. [1]

$\Delta$  je poměrný rozdíl indexu lomu mezi jádrem  $n_1$  [-] a pláštěm  $n_2$  [-] optického vlákna, který bývá řádově 0,01. Pro poměrný rozdíl indexu lomu platí vztah (2.1):

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{\frac{n_1 + n_2}{2}} \quad [-] \quad (2.1) [7]$$

Numerická apertura  $NA$  (2.2) charakterizuje schopnost vlákna přijímat, vést a předávat optický signál (světlo) a zásadně určuje parametry při jeho navázání, vedení a vyvázání. [2]

$$NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad [-] \quad (2.2) [7]$$

Numerická apertura  $NA$  je sinusovou funkcí maximálního úhlu  $\theta_a$  [°] (2.3), paprsky přicházející maximálně pod tímto úhlem se uvnitř vlákna budou šířit, paprsky s větším úhlem než  $\theta_a$  se vláknem šířit nebudou. Úhel  $\theta_a$  je také označován jako příjmový, akceptační nebo aperturní. [10]

$$NA = \sin \theta_a \quad (2.3) [7]$$



Numerickou aperturu lze vypočítat i z měřených hodnot vstupního výkonu do vlákna  $P_{in}$  [W] a výstupního výkonu z vlákna  $P_{out}$  [W] podle vztahu (2.4):

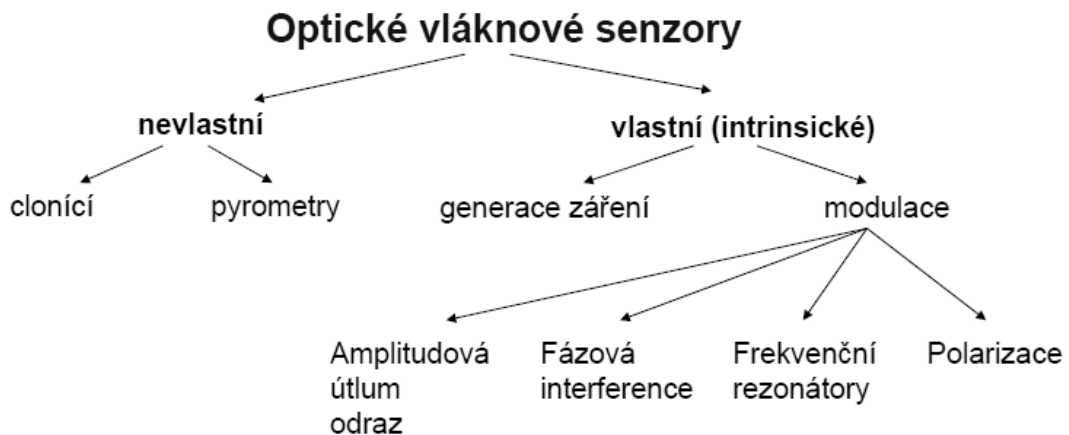
$$NA \approx \sqrt{\frac{P_{in}}{P_{out}}}. \quad (2.4) [7]$$

Vztah mezi numerickou aperturou a poměrným rozdílem indexu lomu je uveden níže (2.5):

$$NA = \sqrt{n_1(2\Delta)}. \quad (2.5) [7]$$

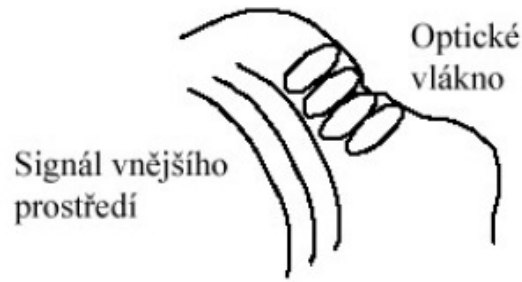
### 2.3 Rozdělení a vlastnosti OVS

OVS jsou v podstatě rozděleny do dvou základních skupin podle způsobu použití optického vlákna. První skupina představuje vlastní vláknové optické senzory a druhá skupina zahrnuje nevlastní optické vláknové senzory.



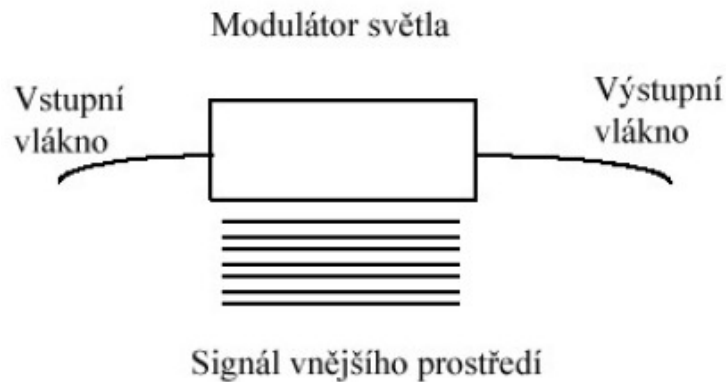
**Obrázek 2.5** Dělení OVS. [1]

Vlastní OVS (Obrázek 2.6) – měřená veličina ovlivňuje přenos světla přímým působením na optické vlákno (např. OVS s amplitudovou modulací změnou útlumu vlákna mikroohyby). Optické vlákno je zde snímacím prvkem.



**Obrázek 2.6** Vlastní OVS. [8]

Nevlastní OVS (Obrázek 2.7) používají optické vlákna pouze k přenosu záření od zdroje záření k místu působení měřené veličiny a odtud k snímači záření. Zde je do vlákna vložen prvek, který moduluje optický signál, jenž přes něj prochází (např. senzor polohy clonící světelný tok přiváděný svazkem optických vláken k optickému senzoru). Tyto OVS se používají hlavně v pyrometrii v oblasti infračerveného záření. Optické vlákno je zde jako prostředek pro předávání signálu.



**Obrázek 2.7** Nevlastní OVS. [8]

Další nejčastěji používané dělení OVS je podle: [2]

1. měřené fyzikální veličiny:
  - mechanické
  - elektrické
  - magnetické
  - tepelné
  - radiační
  - chemické
  - biologické
2. použitého druhu modulace:
  - amplitudové (intenzitní)
  - fázové
  - vlnové délky
  - polarizační
3. konstrukce a koncepce OVS:
  - vlastní
  - nevlastní
  - bodové
  - rozprostřené
4. použité metody měření:
  - analogové
  - číslicové

Mimo základní parametry, které mají OVS shodné s klasickými snímači, jako jsou:

- citlivost
- linearita
- dynamika (rozsah i odezva)
- přesnost
- stabilita
- rozměry a hmotnost
- ekonomické parametry

Jsou u OVS definovány některé další parametry rozdílné oproti klasickým snímačům, které vycházejí z jejich rozdílného principu činnosti: [5]

- modulační index  $Q$

$$Q = \frac{\Delta P}{P_0 x} = \frac{\Delta I}{I_0 x} \quad [-] \quad (2.6) [5]$$

$\Delta P$  – změna optického výkonu vyvolaná měřenou veličinou  $x$  [W]  
 $\Delta I$  – změna optické intenzity vyvolaná měřenou veličinou  $x$  [W.m<sup>-2</sup>]  
 $P_0$  – optický výkon bez působení měřené veličiny  $x$  [W]  
 $I_0$  – optická intenzita bez působení měřené veličiny  $x$  [W.m<sup>-2</sup>]  
 $x$  – měřená veličina (obecně)

- citlivost (strmost)  $S$

$$S = q_s P_0 R_z Q \quad [\text{A} \cdot \Omega] \quad (2.7) [5]$$

$q_s$  – citlivost snímače záření [A.W<sup>-1</sup>]

$R_z$  – zatěžovací odpor snímače záření [ $\Omega$ ]

- práh citlivosti (rozlišení)  $x_{min}$

$$x_{min} = \frac{1}{Q} \left( \frac{2eB}{qP_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [-] \quad (2.8) [5]$$

$e$  – náboj elektronu [C] ( $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$  C)

$B$  – šířka frekvenčního pásma [Hz]

### 2.3.1 Amplitudové OVS

Amplitudový (intenzitní) OVS je nejrozšířenějším typem OVS, který využívá amplitudovou modulaci měřenosného signálu. Amplitudová modulace optického signálu se může uskutečnit:

- změnou tlumení (přímým zeslabením světla),
- změnou přechodu a odrazu (např. přerušením optického vlákna a vzájemným pohybem jeho konců),
- porušením okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí,
- změnou vzájemné vazby světlovodů,
- generací záření.

O amplitudových OVS lze najít podrobnější informace v literatuře [2], [3] a [5].

## 2.3.2 Fázové OVS

Fázové OVS jsou nejcitlivější optické vláknové snímače, které jsou založené na fázové modulaci světelné vlny šířící se optickým vláknem. Tyto změny se měří interferometrickými metodami, lze měřit fáze od  $10^{-8}$  rad. Snímaná veličina způsobuje změnu fáze světelné vlny prostřednictvím změny délky, indexu lomu a průřezu optického vlákna. Jako základ konstrukce fázových OVS se používají optické vláknové interferometry:

- dvojramenný jednovidový interferometr (Mach-Zehnderův nebo Michelsonův)
- jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou (Sagnacův interferometr)
- mezividový interferometr využívající interferenci dvou nebo více vidů světelné vlny

O fázových OVS lze najít podrobnější informace v literatuře [2], [3] a [5].

## 2.3.3 OVS polarizační a s modulací vlnové délky

U těchto OVS existuje díky použití modulace optického signálu v optickém vlákně velké množství rozdílných konstrukcí s různou citlivostí.

Polarizační OVS využívají následujících fyzikálních jevů:

- Faradayův magnetický jev
- Kerrův jev
- Elektropyretický jev
- Pockelsův jev
- Fotoelastický jev
- optickou aktivitu roztoku

Polarizační OVS se dělí na:

- senzory s modulací otočení roviny polarizace,
- senzory s indukovaným dvojlomem.

O OVS polarizačních a s modulací vlnové délky lze najít podrobnější informace v literatuře [2], [3] a [5].

## 2.4 OVS pro měření výšky hladiny

U OVS pro měření výšky hladiny se využívají podobné měřicí principy jako u OVS pro měření např. tlaku, teploty, průtoku, polohy nebo posunutí. Snímání výšky hladiny může být prováděno buď formou přepínačů (bodové měření, např. min/max úroveň měření) nebo jako kontinuální měření.

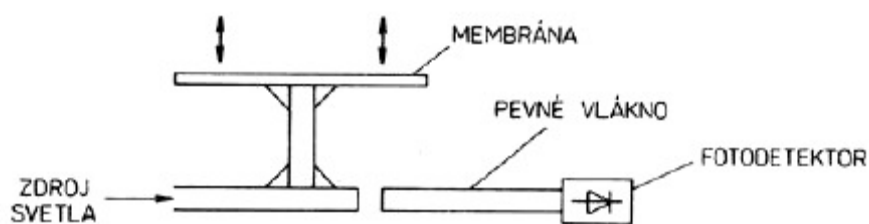
OVS jsou vhodné pro aplikace měření výšky hladiny kapalin, zejména v oblastech, kde je odolnost proti elektromagnetickým rušením (EMI) a elektrická izolovanost nezbytně nutná, např. sledování hladiny v nádržích s ropou, kde je atmosféra v blízkosti nádrží s ropou hořlavá, a proto jakákoli elektrická jiskra může způsobit závažnou katastrofu. [4]

Nejčastější typy OVS používané pro měření výšky hladiny jsou:

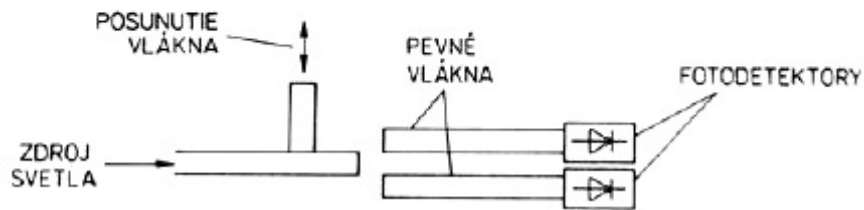
- snímače s přerušným optickým vláknem
- snímače s porušením okrajových podmínek
- reflexní sondy
- snímače založené na mikroohybech

### 2.4.1 Snímače s přerušným optickým vláknem

U snímačů s přerušným optickým vláknem je snímaná veličina transformována na posunutí jednoho konce optického vlákna (amplitudová modulace). Snímače mohou mít jeden (Obrázek 2.8) nebo více (Obrázek 2.9) detektorů. Výhodou těchto senzorů je jednoduchá konstrukce. Nevýhodou malá mechanická odolnost. [5]



**Obrázek 2.8** Obecný princip snímače s přerušným optickým vláknem s jedním detektorem. [3]



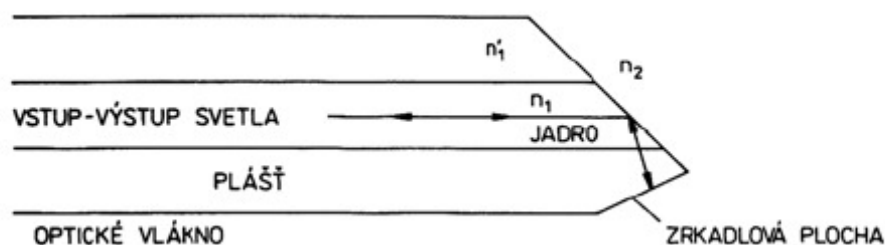
**Obrázek 2.9** Obecný princip snímač s přerušným optickým vláknem se dvěma detektory. [3]

Snímače s jedním detektorem slouží při měření hladiny k určení pouze jedné konkrétní výšky hladiny (bodové měření) např. pro měření min/max. V případě snímače se dvěma detektory však mohou být použity i pro kontinuální měření výšky hladiny. U snímače se dvěma detektory se využívá diferenciální zapojení, kdy je poměrově měřen výstup z obou detektorů za účelem lokalizace pozice vstupního vlákna (kontinuální měření výšky hladiny).

## 2.4.2 Snímače s porušením okrajových podmínek

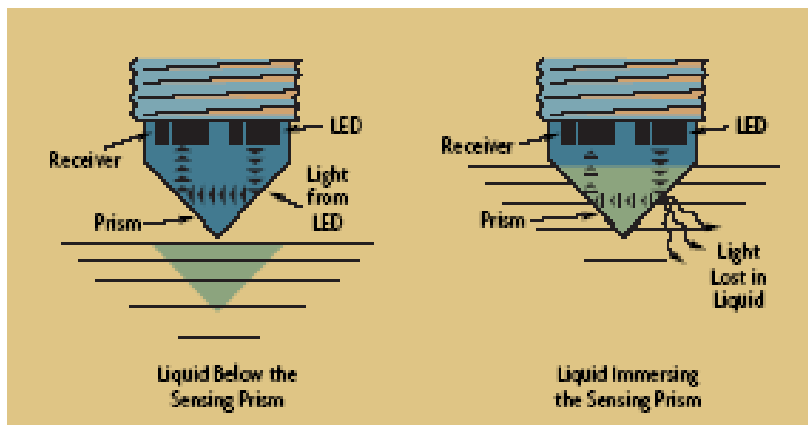
Snímače s porušením okrajových podmínek využívají porušení podmínky úplného vnitřního odrazu (např. na rozhraní mezi jádrem a pláštěm optického vlákna).

U snímače s využitím úplného odrazu na konci optického vlákna je principem činnosti úplný odraz na konci jednovidového optického vlákna, které je zakončeno zešíkmením (Obrázek 2.10). Když má prostředí, ve kterém se nachází konec optického vlákna dostatečně malý index lomu, nastává úplný odraz světelných paprsků od zrcadlového povrchu zpět do vlákna. Jestliže je konec vlákna obklopen prostředím s indexem lomu skla, pak část světelných paprsků přejde do okolního prostředí (nenastane úplný odraz) a zvýší se útlum, který je měřen. Výhodou je, že jedno optické vlákno tvoří vstup i výstup optického signálu, což zvyšuje jeho mechanickou odolnost. Nevýhodou jsou vysoké nároky na přesnost výroby mechanických prvků. [5]



**Obrázek 2.10** Snímač s využitím úplného odrazu na konci optického vlákna. [3]

Při měření výšky hladiny pomocí těchto snímačů se využívá porušení podmínky úplného vnitřního odrazu na rozhraní mezi vláknem a prostředím, ve kterém se nachází. Ukázka činnosti snímače je na Obrázek 2.11.



**Obrázek 2.11** Snímač přítomnosti kapaliny s porušením okrajových podmínek. [15]

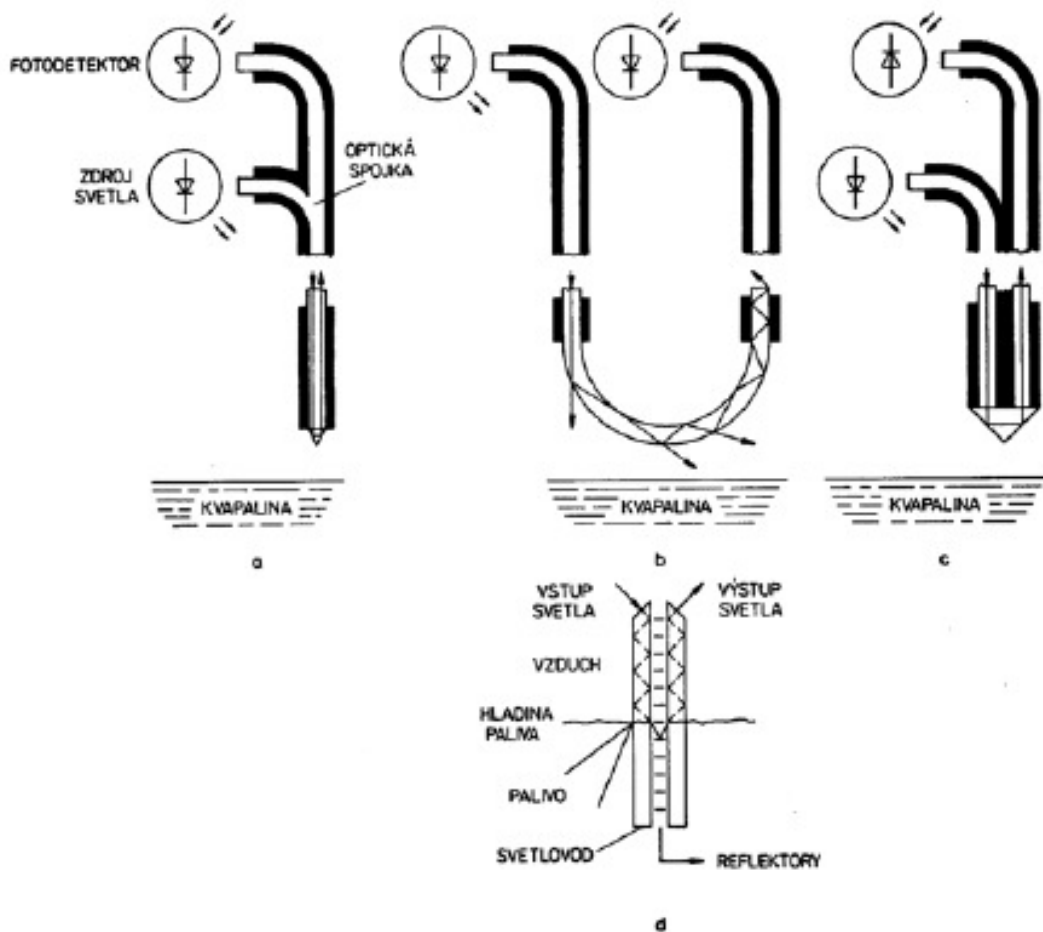
V praxi je tento druh snímače velmi rozšířený pro bodové měření výšky hladiny. Praktická ukázka realizace snímače s porušením okrajových podmínek od firmy Honeywell typ LLN je na Obrázek 2.12.



**Obrázek 2.12** Snímače s porušením okrajových podmínek od firmy Honeywell typ LLN. [13]

Tyto snímače mají různé modifikace, u kterých často nebývá používáno jen jedno vlákno, ale vlákna dvě. Typy používaných snímačů výšky hladiny jsou zobrazeny viz. Obrázek 2.13.

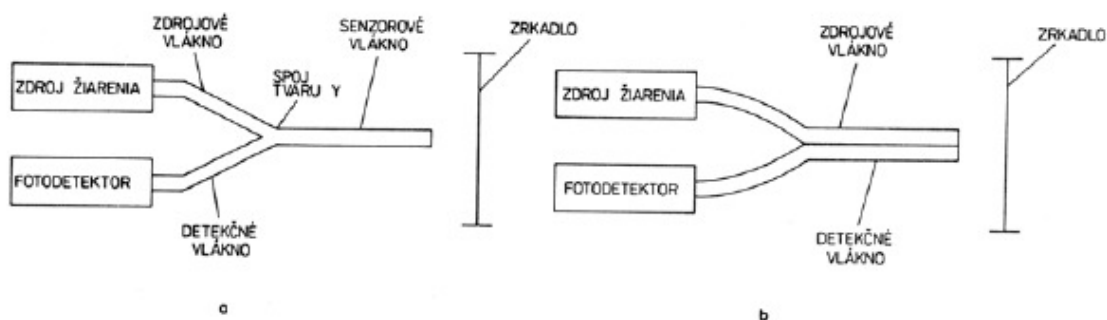




**Obrázek 2.13** Typy snímačů hladiny s porušením okrajových podmínek. [3]  
 a) jednovláknový, b) s vláknem ve tvaru „U“, c) dvouvláknový s optickým hranolem,  
 d) dvouvláknový s externími reflektory

### 2.4.3 Reflexní sonda

U reflexních snímačů (sond) má optické vlákno zároveň funkci vstupu i výstupu optického signálu. Vazba mezi vstupním a výstupním vláknem se uskutečňuje odrazem od pohyblivé odrazové plochy (zrcadlo), která je vychylována měřenou veličinou. Výhodou sond je jejich jednoduchá výroba. [5] Ukázka jednovláknové a dvouvláknové reflexní sondy je na Obrázku 2.14.

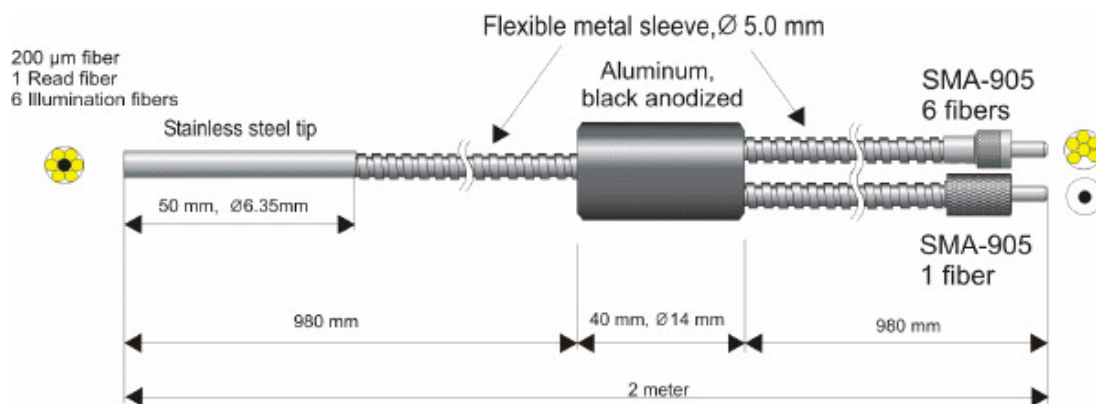


**Obrázek 2.14** Reflexní sondy: a) jednovláknová, b) dvouvláknová. [3]

Reflexní sondy jsou v praxi velice časté, používají se pro kontinuální měření výšky hladiny. Měření má dva principy:

- Odrazová plocha je vychylována přímo pohybem hladiny měřené kapaliny.
- Odrazová plocha je vychylována tlakem měřené kapaliny podle výšky její hladiny.

Často se také používají sondy, které mají více optických vláken spojených ve svazcích (Obrázek 2.15).



**Obrázek 2.15** Reflexní sonda se svazkem optických vláken. [14]

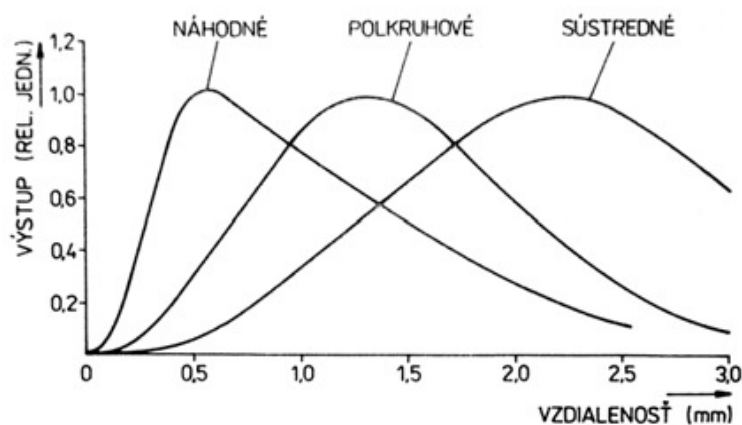
Svazky mají různá uspořádání osvětlovacích (vstupních) a detekčních (výstupních) vláken, nejčastěji používané jsou (Obrázek 2.16):

- náhodné,
- půlkruhové,
- soustředěné.



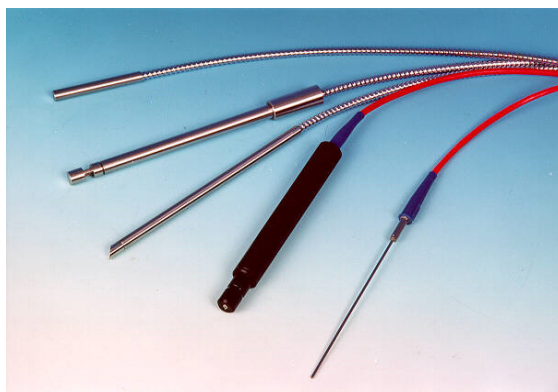
**Obrázek 2.16** Nejčastěji používaná uspořádání svazků. [3]

Podle uspořádání svazků osvětlovacích a detekčních optických vláken se mění závislosti relativní celkové výstupní intenzity světla na vzdálenosti odrazové plochy, jak je patrné níže (Obrázek 2.17).



**Obrázek 2.17** Závislosti celkové výsledné relativní intenzity světla z reflexní sondy pro různá uspořádání osvětlovacích a detekčních vláken. [3]

V praxi jsou reflexní sondy velmi rozšířené a existuje velké množství typů, které se liší tvarem, velikostí a délkou podle způsobu použití. Příklad praktické realizace sond viz. Obrázek 2.18.

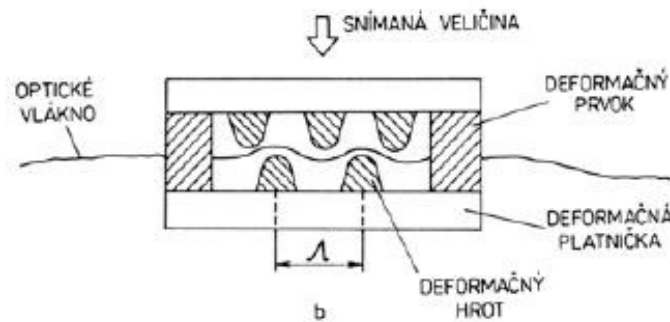


**Obrázek 2.18** Možné realizace reflexních sond. [14]

## 2.4.4 Snímače založené na mikroohybech

Tyto snímače mají mnoho modifikací v závislosti na konstrukci deformačních prvků. Jsou poměrně jednoduché a kompaktní. Jejich velkou výhodou je vysoká citlivost a velký dynamický rozsah.

Mikroohybové snímače (Obrázek 2.19) měří pokles intenzity signálu vystupujícího z konce jádra snímacího optického vlákna. Snímací vlákno je vlivem měřené veličiny působící na destičku ohýbáno mezi deformačními zuby umístěnými na destičkách a intenzita světla se tím snižuje. Toto platí pro měření vidů ve světlém poli nebo se měří nárůst intenzity světla, které vlivem mikroohybů uniká přes plášť do okolního prostředí (měření v tmavém poli). [5]



**Obrázek 2.19** Princip snímače založeném na mikroohybech. [3]

Mikroohyby mají zakřivení srovnatelné s průměrem optického vlákna. Ohybové ztráty se dají vyjádřit koeficientem ohybových ztrát  $\alpha_r$  podle vztahu: [7]

$$\alpha_r = c_1(R) \cdot e^{-c_2(R) \cdot R}, \quad [-] \quad (2.9) [7]$$

kde  $R$  je poloměr zakřivení [m] a koeficienty  $c_{1,2}(R)$  jsou konstanty nezávislé na zakřivení [-].

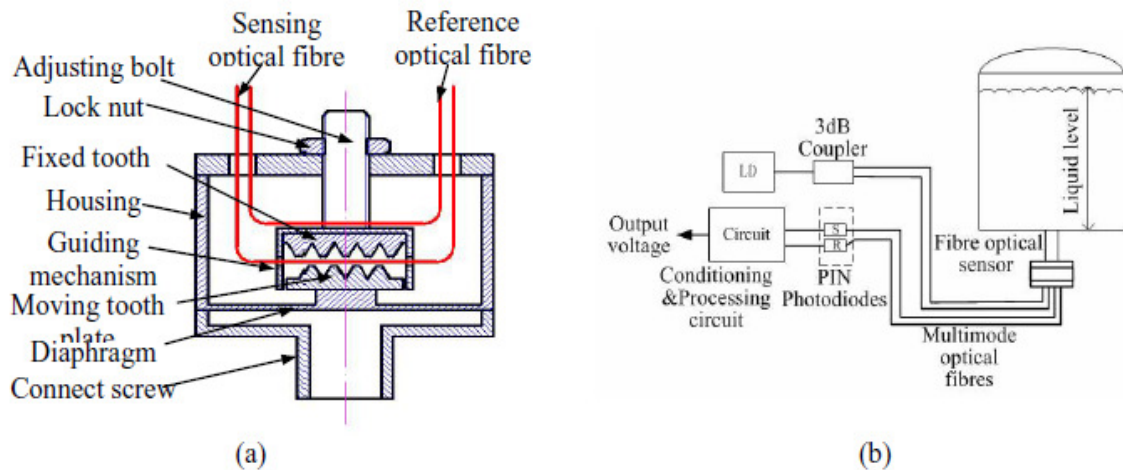
Pro 100% ztrátu energie ve vícemodovém vlákně se zavádí výraz kritický poloměr zakřivení  $R_c$ , pro který platí: [7]

$$R_c = \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}}, \quad [m] \quad (2.10) [7]$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka světla [m].

Pro tyto optická vlákna je kritický poloměr zakřivení v řádech mikrometrů, což je v praxi takřka nedosažitelné a spíše vlákno praskne. [7]

Mikrohybové snímače měření výšky hladiny (Obrázek 2.21) jsou založené na převodu výšky hladiny na měření tlaku, kdy se vlivem změn tlaku závislých na výšce měřené hladiny mění velikost deformace měřícího optického vlákna pohybem horní destičky s deformačními hroty proti hrotům na pevné spodní destičce.



**Obrázek 2.20** Měření výšky hladiny s tlakovým snímačem a) struktura snímače, b) konfigurace systému. [4]

## 3 NÁVRH A REALIZACE

Navrhované měřicí přípravky se snímači mají mít možnost kontinuálního měření výšky hladiny a dále min/max měření výšky hladiny, což znamená spojité a bodové měření. Snímač proto nebude jeden, ale čtyři a to:

- snímač minima,
- snímač maxima,
- snímač kontinuálního měření založený na mikroohybech,
- snímač kontinuálního měření pomocí reflexní sondy.

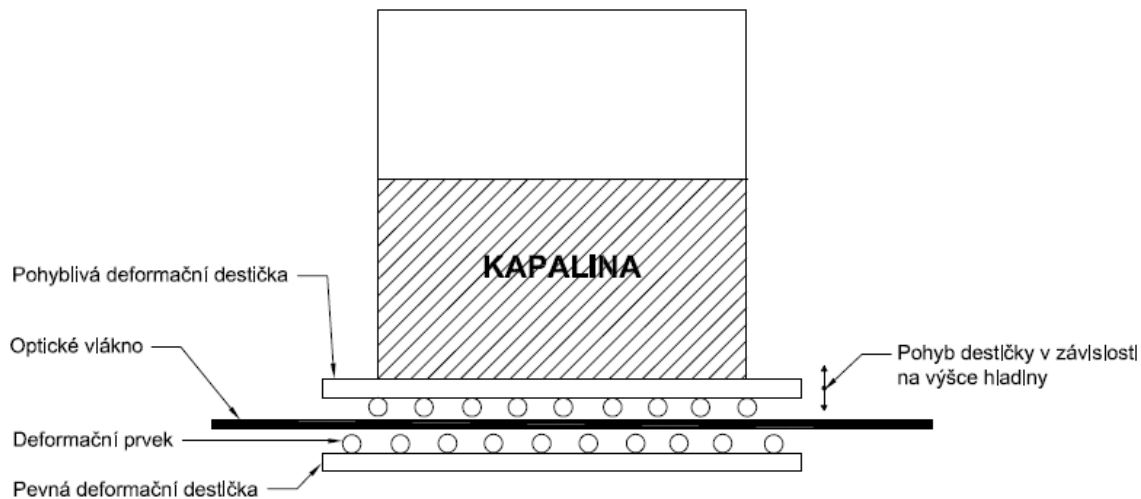
### 3.1 Teorie návrhu

Obecně se konstrukční návrh snímače řídí zejména požadavky:

- přesnost
- stabilita charakteristik
- linearita
- rozměry a hmotnost
- citlivost
- rozsah
- rozmezí pracovních teplot
- životnost
- agresivita prostředí
- ekonomické parametry

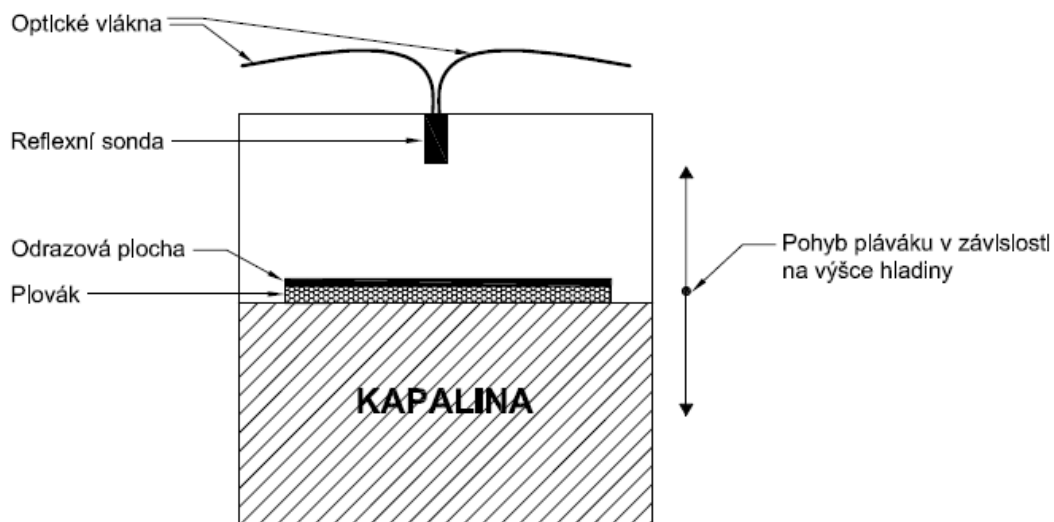
Navrhované přípravky budou provozovány v laboratoři optoelektroniky pro měření laboratorní úlohy pro studenty. Proto není důležitý rozsah teplot, agresivita prostředí a i životnost je druhořadá. U přípravků jsou použity OVS vlastní (intristické) s amplitudovou modulací. Pro kontinuální měření výšky hladiny jsou použity dva principy měření.

OVS na principu mikroohybů s jednoduchou konstrukcí deformačního prvku, který má velkou výhodu ve vysoké citlivosti, velkém dynamickém rozsahu a kompaktnosti. Princip měření Obrázek 3.1.



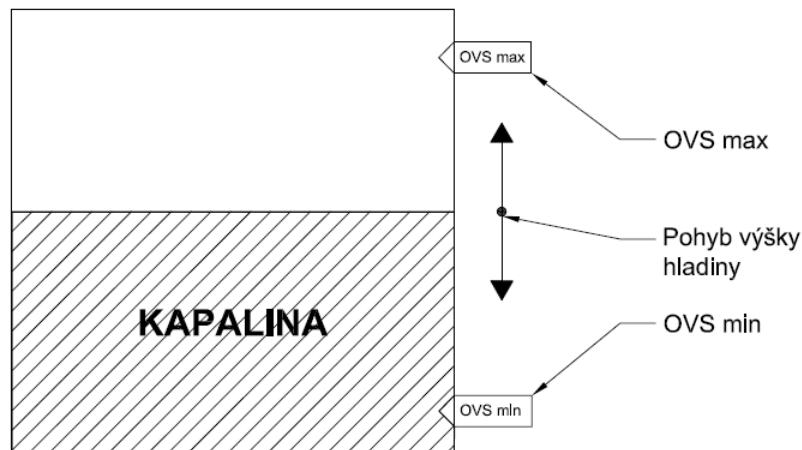
**Obrázek 3.1** Kontinuální měření výšky hladiny mikrohybovým snímačem.

Druhým principem kontinuálního měření je reflexe (odraz) optického paprsku od odrazové plochy umístěné na plováku. Princip měření Obrázek 3.2.



**Obrázek 3.2** Kontinuální měření výšky hladiny reflexní sondou.

Pro bodové měření min/max výšky hladiny jsou použity dva snímače založené na principu porušení okrajových podmínek. Princip měření Obrázek 3.3.



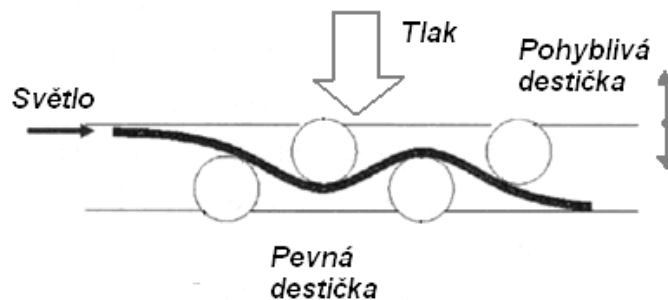
**Obrázek 3.3** Snímač s porušením okrajových podmínek pro min/max měření.

## 3.2 Kontinuální měření výšky hladiny

Přípravek pro kontinuální měření obsahuje dva vlastní OVS s amplitudou modulací, ale každý snímač pracuje na rozdílném principu. První snímač pracuje na základě mikroohybů, tento snímač byl vyroben (nebyl k dispozici). Druhý snímač je reflexní sonda, která je používána v laboratoři optoelektroniky.

### 3.2.1 Mikroohybový OVS

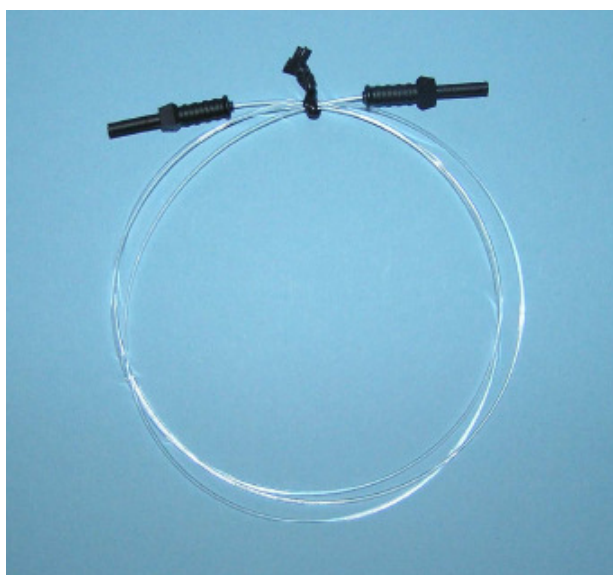
Pro kontinuální měření je použit OVS založený na principu mikroohybů optického vlákna, který převádí výšku hladiny na tlak. Tlak kapaliny je přeměněn na malý posun měřicí destičky s deformačními prvky. Snímací vlákno je ohýbáno mezi deformačními prvky dvou protilehlých destiček a intenzita světla je tím snížena, přičemž spodní destička je pevně přichycena k podložce a tlakem se posunuje pouze horní destička. Deformační prvky jsou na destičkách umístěny tak, že deformační prvky zapadají na protilehlé měřicí destičce do mezer mezi deformačními prvky viz. Obrázek 3.4.



**Obrázek 3.4** Princip mikroohybového snímače.



Jako měřicí vlákno (Příloha 1) je použito standardní jeden metr dlouhé plastové optické vlákno (POF – plastic optical fiber) mnohavidové (MM – multimode) se skokovou změnou indexu lomu (SI – step index) s ochrannou vrstvou z černého polyethylenu o průměru 2,2 mm (byla odstraněna, vlákno je holé), průměrem pláště 1 mm, průměr jádra 0,98 mm a numerickou aperturou (NA) asi 0,5. Jádro a plášť jsou vyrobeny z polymethylmetakrylátu (PMMA) a fluorovaných polymerů. Indexy lomu jádra a pláště jsou 1,492 a 1,417. Vlákno je zakončeno HFBR konektory, které se musely pomocí redukce změnit na SMA konektory a po té přes propojovací optické vlákno (typ MM-SI) změnit na ST konektory pro připojení zdroje a detektoru záření. Tyto úpravy trasy nejsou příliš vhodné z důvodů možného zanesení nejistoty do měření. Ukázka měřicího vlákna je na Obrázek 3.5.

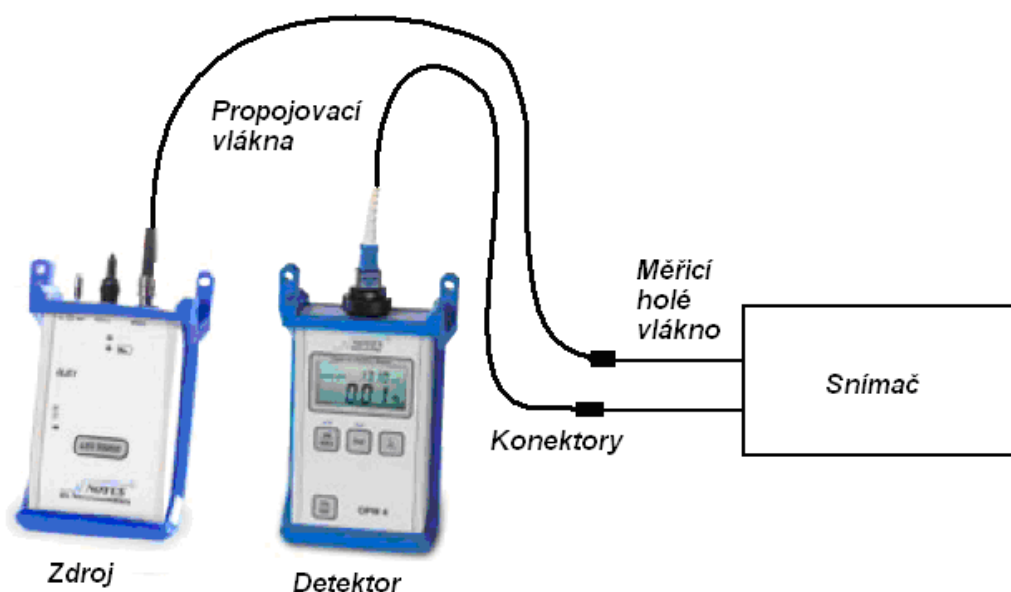


**Obrázek 3.5** Měřicí holé vlákno.

Pro napájení a měření byla použita měřicí souprava NOYES MLP 4-2, která obsahuje:

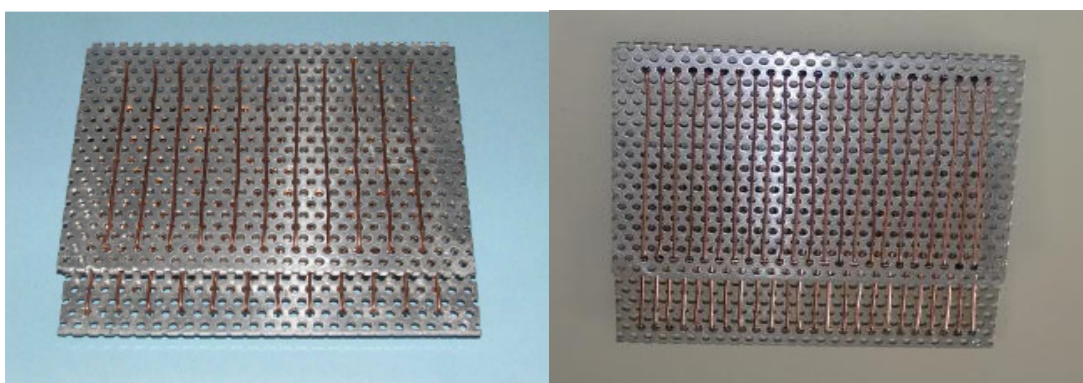
- zdroj optického záření OLS1-2C ST, v. č. 1S29KB014 (BL4),
- měřič optického výkonu OPM4-2C, v. č. 1S28DE005 (BL2).

Ze zdroje je vysíláno optické záření o vlnové délce 850 nm, které prochází přes měřicí vlákno a je přiváděno do detektoru. Detektor měří optický výkon záření vysílaného ze zdroje přes měřicí vlákno, které je vystaveno účinkům měřené veličiny viz. Obrázek 3.6. Pro použité měřicí vlákno by byla vhodnější vlnová délka záření 660 nm místo použitých 850 nm (zdroj neumožňuje tuto vlnovou délku záření), což je dobře patrné z Figure 1 v Příloha 1.



**Obrázek 3.6** Propojení mikrohybového snímače se zdrojem a detektorem.

Samotný snímač je tvořen dvěma kovovými destičkami o rozměrech 130 x 95 mm a tloušťce 2 mm, které jsou umístěny nad sebou. Na destičkách jsou umístěny deformační prvky vytvořené z měděného drátu ve dvou průměrech (1 nebo 2 mm). Velikosti deformačních prvků byly zvoleny blízko průměru měřicího vlákna, protože mikroohyby mají zakřivení srovnatelné s průměrem optického vlákna. Perioda mezi jednotlivými deformačními prvky je 5 nebo 10 mm (viz. výpočet kritické periody mikroohybů 3.3). Deformační prvky na měřicích destičkách zapadají vždy do mezery mezi deformačními prvky na protější destičce (Obrázek 3.7).

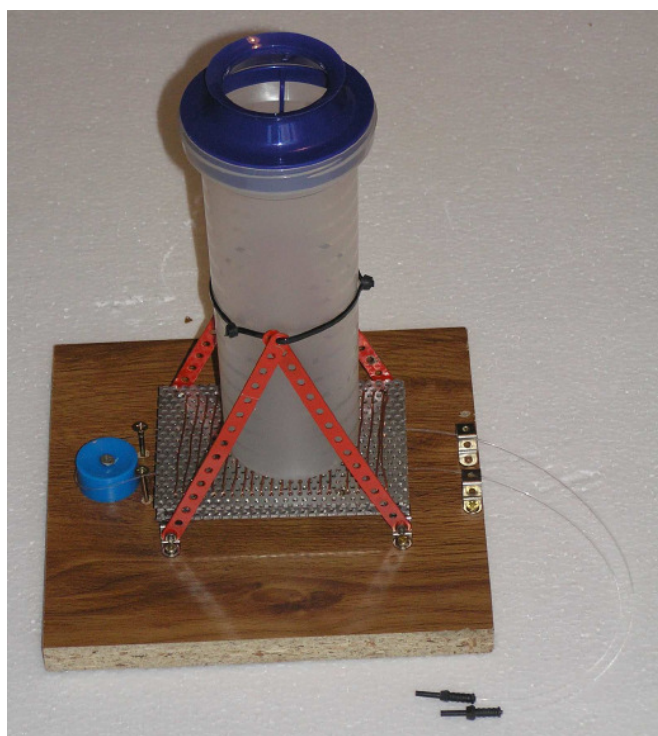


**Obrázek 3.7** Měřicí destičky s deformačními prvky.

Na spodní pevné destičce je 12 respektive 24 deformačních prvků, podle periody 5 nebo 10 mm. Na horní pohyblivé destičce je 11 nebo 23 deformačních prvků podle jejich periody. Je zřejmé, že s rostoucím počtem deformačních prvků se zvyšuje ztráta výkonu. Více deformačních prvků znamená, že optické vlákno ve snímači podstoupí

více geometrických deformací, a tím se zvyšují ztráty záření s počtem deformačních prvků. Počty deformačních prvků byly zvoleny maximální vzhledem k rozměrům destiček a zvolené periodě deformačních prvků na destičkách. Nevýhodou při vyšším počtu deformačních prvků může být to, že deformované vlákno hůře klouže přes deformační prvky a nedochází tím k maximální deformaci vlákna.

Spodní destička je pevně připevněna k dřevěné podložce o rozměrech 230 x 230 mm. Horní destička je volná, ale její pohyb je omezen pouze nahoru a dolů tím, že jsou v rozích destiček prvky, které je vystředují. Velikost destiček byla zvolena z důvodu snadného uchycení nádoby, ve které měříme výšku hladiny. Nádoba je na destičce volně postavena. Jen je vystředěna pomocí jednoduchého držáčku, který zároveň zabraňuje jejímu převržení. Na boční straně nádoby je nalepena stupnice pro snadné a přesné odečítání výšky hladiny.

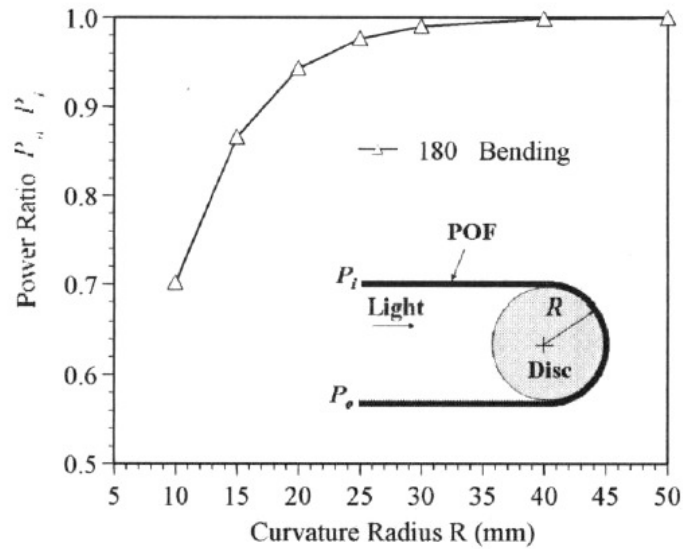


**Obrázek 3.8** Měřicí přípravek pro kontinuální měření hladiny.

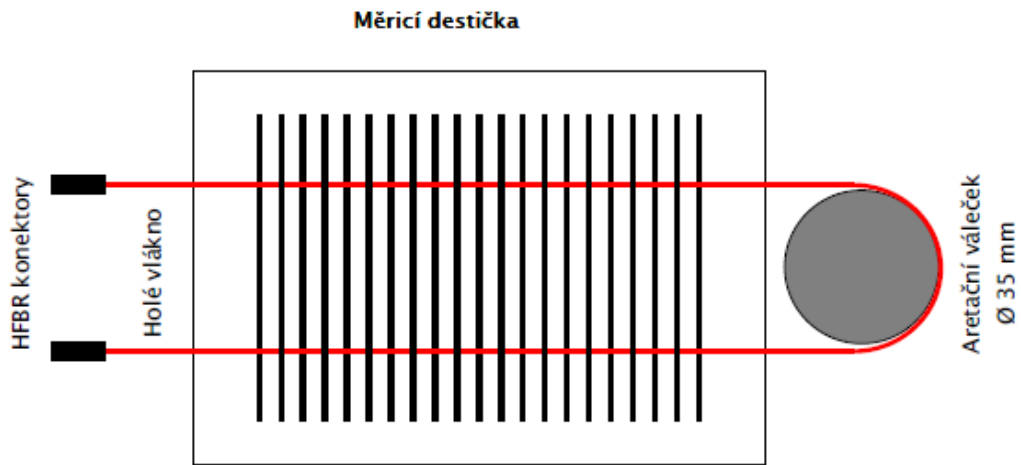
Měření vytvořeným mikroohybovým snímačem probíhalo od prázdné nádoby (výška hladiny 0 mm) po maximální výšku hladiny 190 mm.

Pro zvýšení citlivosti snímače je vlákno vedeno přes snímač dvojitě. Jednou od zdroje světelného záření přes snímač, za kterým se pak vlákno otočí o 180 ° přes aretační váleček (váleček musí mít průměr alespoň 35 mm, aby ztrátový výkon ohybu byl zanedbatelný viz. Obrázek 3.9 [6]) a vrací se přes snímač do detektoru

(Obrázek 3.10). Délka vláken jen mezi deformačními prvky destičky bude 2x 110 mm.



**Obrázek 3.9** Ztráty optického vlákna při ohybu s poloměrem zakřivení 180 °. [6]



**Obrázek 3.10** Mikrohybový snímač výšky hladiny.

Pro mikrohybový snímač lze podle optické vlnové teorie odvodit součinitel zeslabení  $\alpha$  jako (3.1): [4]

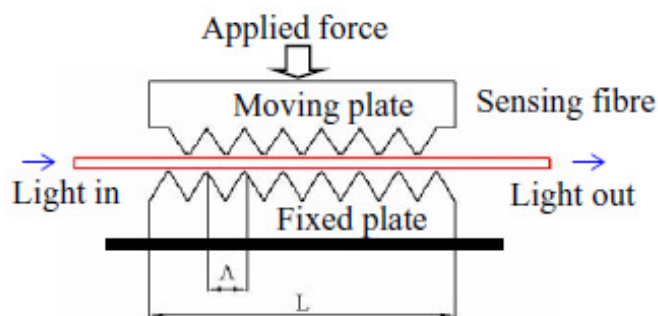
$$\alpha \approx \frac{1}{4} KD^2(t)L \left| \frac{\sin \left[ (q - \Delta B) \frac{L}{2} \right]}{(q - \Delta B) \frac{L}{2}} \right|^2, \quad [-] \quad (3.1) [4]$$

kde  $K$  je konstanta [-],  $D(t)$  je velikost mikroohybů [m],  $L$  je délka měřicích optických vláken jen mezi deformačními prvky destiček [m],  $q$  je perioda deformačních prvků [m] a  $\Delta\beta$  je konstanta šíření [-].

Perioda mikroohybů  $\Lambda_0$  může být spočítána podle (Obrázek 3.10):

$$\Lambda_0 = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \left(1 + \frac{2}{\xi}\right)^{1/2} \frac{\pi a}{\Delta^{1/2}} \left(\frac{M}{m}\right)^{\frac{\xi-2}{\xi+2}}, \quad [\text{m}] \quad (3.2) [4]$$

kde  $\pi$  je Ludolfovo číslo, které je přibližně 3,14159265.  $\xi$  je konstanta určující profil indexu lomu vlákna.  $\Delta$  je poměrný rozdíl indexu lomu mezi jádrem a pláštěm optického vlákna [-],  $a$  poloměr jádra vlákna [m],  $M$  je celkový počet vidů [-] a  $m$  je číslo vidu [-].



**Obrázek 3.11** Výpočet mechanické periodicity.[4]

Konstanta v závislosti na indexu lomu vlákna  $\xi$  je pro vlákno se skokovou změnou  $\xi = \infty$ . V multividovém vlákne jsou vyšší vidy ty, které nejnadněji opouští vlákno v malých ohybech. Proto se předpokládá  $M = m$  a kritická perioda mikroohybů  $\Lambda_c$  je (3.3) [4]:

$$\Lambda_c = \frac{\pi a}{\Delta^{1/2}}. \quad [\text{m}] \quad (3.3) [4]$$

Pro námi použité vlákno potom platí (viz. 2.1, 3.3):

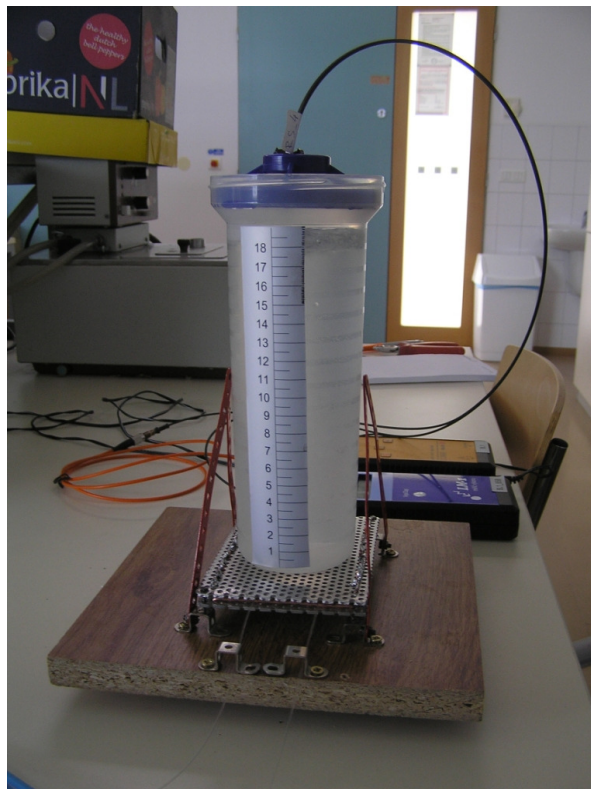
$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = \frac{1,492 - 1,417}{1,492 + 1,417} = \underline{\underline{0,052}}$$

$$\Lambda_c = \frac{\pi a}{\Delta^{1/2}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \pi}{0,052^{1/2}} \doteq \underline{\underline{7 \cdot 10^{-3} \text{ m}}}$$

V důsledku kritické periody mikroohybů, která je asi 7 mm, byla zvolena perioda deformačních prvků na měřicích destičkách o něco větší, proto 10 mm. Zároveň byla zvolena druhá perioda menší než kritická 5 mm pro vyzkoušení jejího vlivu. Z tohoto důvodu byly také použity deformační prvky z kulatého drátu (nemá tak ostrý ohyb), aby nedošlo k poškození měřicího optického vlákna. V praxi se běžně používají trojúhelníkové hroty (deformační prvky ve tvaru trojúhelníků), přes které je velmi ostrý lom (ohyb).

### 3.2.2 Reflexní sonda

Pro kontinuální měření výšky hladiny reflexní sondou je použita stejná nádoba, respektive celý měřicí přípravek pro kontinuální měření mikroohybovým snímačem (Obrázek 3.12). Výhoda je v tom, že měření pomocí obou metod mohou probíhat současně. Bohužel použitá reflexní sonda (sonda ze stavebnice OPTEL) neměla dostatečný rozsah pro měření celého rozsahu výšky hladiny v nádobě. Proto měření pomocí reflexní sondy probíhalo až v poslední čtvrtině měřeného rozsahu výšky hladiny, tedy asi od 150 do 195 mm výšky hladiny v nádobě.



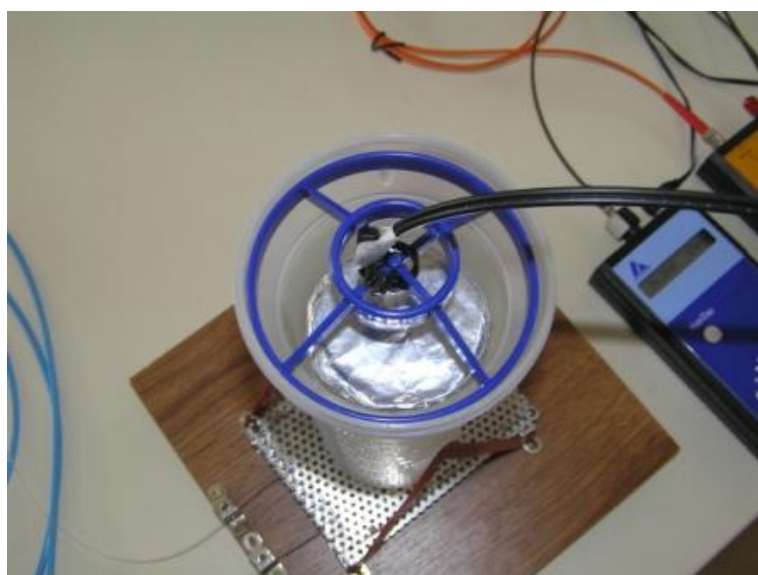
Obrázek 3.12 Měřicí přípravek s reflexní sondou.

Reflexní sonda byla uchycena k plastovému držáku ve středu nádoby ve výšce 205 mm ode dna nádoby (Obrázek 3.13). Umístění sondy v této výšce bylo zvoleno z důvodu, aby bylo možné změřit celou převodní charakteristiku sondy s maximem právě ve 190 mm. Měřená hladina je vždy o 10 mm níž než je odrazová plocha pro sondu (výška plováku viz . níže).



**Obrázek 3.13** Uchycení sondy.

Pro měření výšky hladiny slouží 10 mm vysoký kruhový plovák z polystyrénu. Na jeho horní straně je odrazová plocha pro reflexní sondu. Jako odrazová plocha bylo odzkoušeno několik povrchů (nástrík lesklý a matný chrom, CD), ale jako nejlepší se ukázal obyčejný potravinářský alobal se snadným připevněním na plovák (Obrázek 3.14).

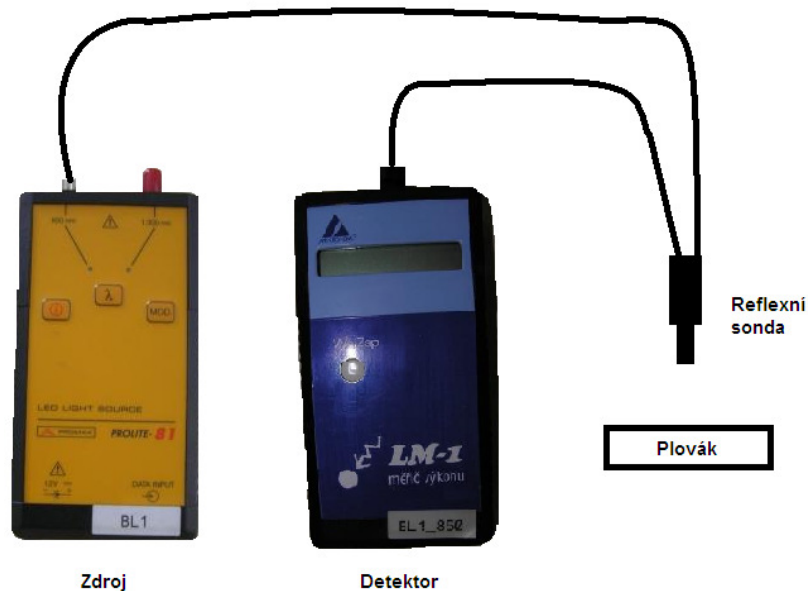


**Obrázek 3.14** Plovák v nádobě.

Pro napájení a měření byly použity přístroje:

- LED LIGHT SOURCE PROMAX PROLITE – 81  
v. č. PL810AES010 (BL1),
- Měřič výkonu MIKROKOM LM-1 (LM-1 / Ge)  
v. č. G0205136 (BL1\_850).

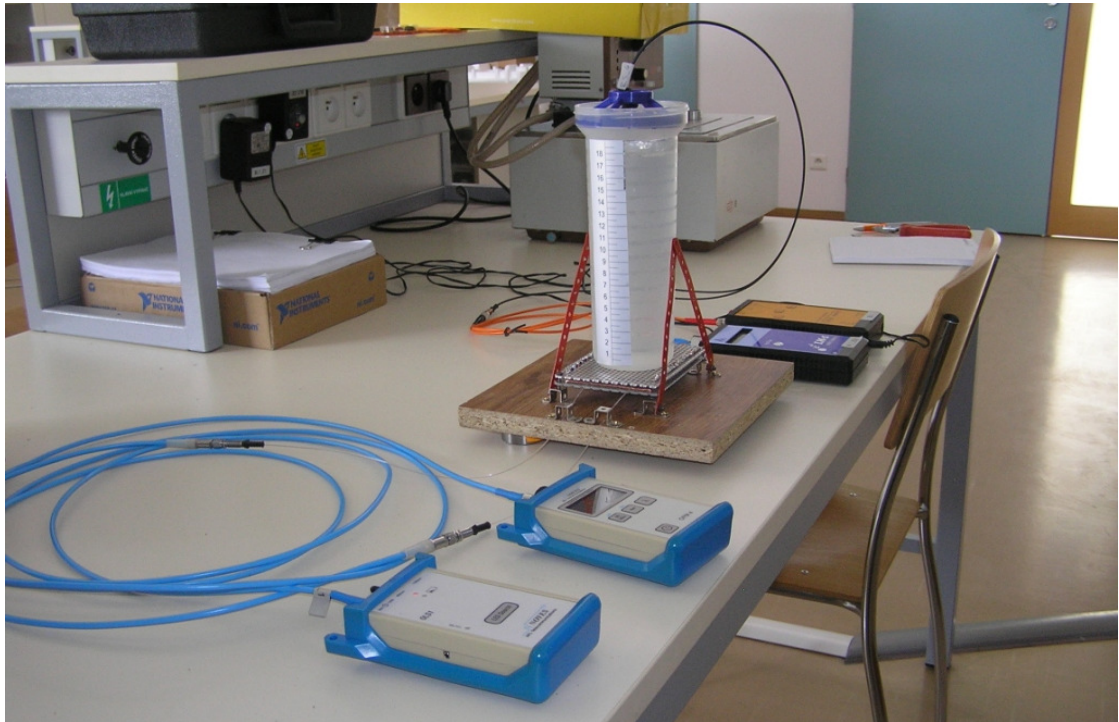
Ze zdroje je vysíláno optické záření o vlnové délce 850 nm, které je vyzářeno sondou a odráží se od odrazové plochy plováku zpět do sondy. Záření přijaté sondou je přiváděno do detektoru. Detektor měří optický výkon záření vyslaného ze zdroje přes reflexní sondu (Obrázek 3.15). Mezi reflexní sondou a zdrojem záření muselo být vloženo optické vlákno pro redukci konektorů z FC na SMA.



Obrázek 3.15 Zapojení reflexní sondy se zdrojem a detektorem.



### 3.2.3 Kontinuální měření



Obrázek 3.16 Měřící pracoviště.

Měření vytvořenými mikroohybovými snímači probíhalo od prázdné nádoby po maximální výšku hladiny 190 mm. Při vstupním výkonu do optického vlákna  $P_i$ , který byl brán pro minimální hladinu v nádobě ( $h = 0$  mm). Na výstupu z vlákna byl měřen výstupní výkon  $P_o$ , který odpovídal velikosti deformací vlákna ve snímači (výšce hladiny). S rostoucí výškou hladiny měřený výkon klesal (deformace se zvětšovala) viz. Tabulka 3.1, kde:

- $P_{o1}$  – výstupní výkon ze snímače 1 s periodou deformačních prvků 5 mm a velikostí deformačního prvku 2 mm,
- $P_{o2}$  – výstupní výkon ze snímače 2 s periodou deformačních prvků 5 mm a velikostí deformačního prvku 1 mm,
- $P_{o3}$  – výstupní výkon ze snímače 3 s periodou deformačních prvků 10 mm a velikostí deformačního prvku 2 mm,
- $P_{o4}$  – výstupní výkon ze snímače 4 s periodou deformačních prvků 10 mm a velikostí deformačního prvku 1 mm,
- $A_1$  – ztráty snímače 1,
- $A_2$  – ztráty snímače 2,
- $A_3$  – ztráty snímače 3,
- $A_4$  – ztráty snímače 4.

**Tabulka 3.1** Změřené a vypočtené hodnoty pro jednotlivé mikroohybové snímače při kontinuálním měření výšky hladiny.

Výška hladiny [mm]	$P_{o1}$ [μW]	$P_{o2}$ [μW]	$P_{o3}$ [μW]	$P_{o4}$ [μW]	$A_1$ [-]	$A_2$ [-]	$A_3$ [-]	$A_4$ [-]
0	0,4593	0,4750	0,4644	0,4586	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,4580	0,4735	0,4633	0,4575	0,9972	0,9968	0,9976	0,9976
10	0,4570	0,4735	0,4622	0,4566	0,9950	0,9968	0,9953	0,9956
15	0,4559	0,4732	0,4608	0,4558	0,9926	0,9962	0,9922	0,9939
20	0,4551	0,4730	0,4595	0,4549	0,9909	0,9958	0,9894	0,9919
25	0,4540	0,4728	0,4574	0,4543	0,9885	0,9954	0,9849	0,9906
30	0,4531	0,4725	0,4558	0,4538	0,9865	0,9947	0,9815	0,9895
35	0,4521	0,4722	0,4545	0,4529	0,9843	0,9941	0,9787	0,9876
40	0,4510	0,4720	0,4522	0,4520	0,9819	0,9937	0,9737	0,9856
45	0,4498	0,4717	0,4498	0,4500	0,9793	0,9931	0,9686	0,9812
50	0,4488	0,4715	0,4480	0,4494	0,9771	0,9926	0,9647	0,9799
55	0,4477	0,4708	0,4457	0,4478	0,9747	0,9912	0,9597	0,9765
60	0,4466	0,4699	0,4432	0,4467	0,9723	0,9893	0,9543	0,9741
65	0,4454	0,4688	0,4402	0,4450	0,9697	0,9869	0,9479	0,9703
70	0,4436	0,4673	0,4373	0,4432	0,9658	0,9838	0,9416	0,9664
75	0,4422	0,4662	0,4343	0,4422	0,9628	0,9815	0,9352	0,9642
80	0,4407	0,4653	0,4320	0,4400	0,9595	0,9796	0,9302	0,9594
85	0,4390	0,4643	0,4288	0,4382	0,9558	0,9775	0,9233	0,9555
90	0,4375	0,4626	0,4262	0,4361	0,9525	0,9739	0,9177	0,9509
95	0,4354	0,4611	0,4225	0,4340	0,9480	0,9707	0,9098	0,9464
100	0,4333	0,4595	0,4187	0,4320	0,9434	0,9674	0,9016	0,9420
105	0,4315	0,4579	0,4150	0,4302	0,9395	0,9640	0,8936	0,9381
110	0,4290	0,4563	0,4114	0,4287	0,9340	0,9606	0,8859	0,9348
115	0,4275	0,4550	0,4088	0,4268	0,9308	0,9579	0,8803	0,9307
120	0,4257	0,4536	0,4058	0,4238	0,9268	0,9549	0,8738	0,9241
125	0,4231	0,4516	0,4026	0,4228	0,9212	0,9507	0,8669	0,9219
130	0,4215	0,4499	0,3990	0,4208	0,9177	0,9472	0,8592	0,9176
135	0,4196	0,4481	0,3950	0,4187	0,9136	0,9434	0,8506	0,9130
140	0,4180	0,4464	0,3924	0,4168	0,9101	0,9398	0,8450	0,9089
145	0,4158	0,4443	0,3887	0,4158	0,9053	0,9354	0,8370	0,9067
150	0,4137	0,4425	0,3850	0,4135	0,9007	0,9316	0,8290	0,9017
155	0,4116	0,4410	0,3821	0,4112	0,8961	0,9284	0,8228	0,8966
160	0,4092	0,4390	0,3781	0,4092	0,8909	0,9242	0,8142	0,8923
165	0,4067	0,4370	0,3750	0,4066	0,8855	0,9200	0,8075	0,8866
170	0,4050	0,4343	0,3726	0,4052	0,8818	0,9143	0,8023	0,8836
175	0,4023	0,4323	0,3696	0,4025	0,8759	0,9101	0,7959	0,8777
180	0,4000	0,4300	0,3663	0,4003	0,8709	0,9053	0,7888	0,8729
185	0,3977	0,4280	0,3632	0,3980	0,8659	0,9011	0,7821	0,8679
190	0,3950	0,4257	0,3600	0,3955	0,8600	0,8962	0,7752	0,8624

Ztráty optického vlákna:

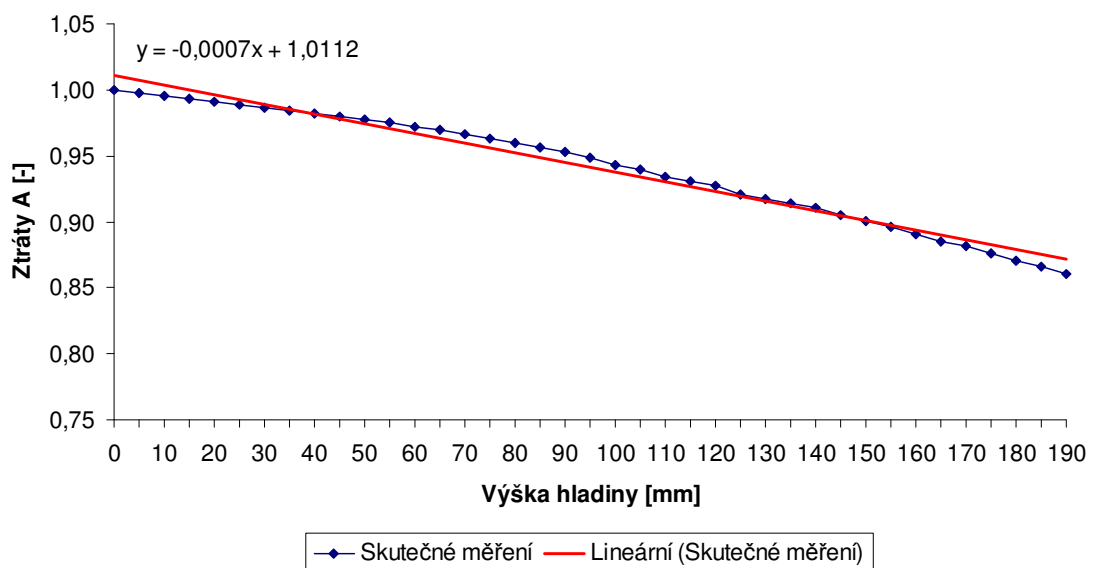
$$A = \frac{P_o}{P_i} \quad [-] \quad (3.4) [7]$$

Vzorový výpočet ztrát  $A_I$  podle (3.4) pro měření výšky hladiny 10 mm (Tabulka 3.1):

$$A_I = \frac{P_{o1}}{P_{i1}} = \frac{0,4570}{0,4593} \doteq \underline{\underline{0,9950}}$$

Ztráty vlákna v závislosti na výšce hladiny pro jednotlivé snímače viz. Obrázek 3.17-20.

**Závislost ztrát mikroohybového snímače 1  
( $\Lambda = 5$  mm, prvek = 2 mm) na výšce hladiny**



**Obrázek 3.17** Závislost ztrát mikroohybového snímače 1 na výšce hladiny.

Z grafu (Obrázek 3.17) a z výpočtu podle vztahu 3.5 je zřejmé, že charakteristika závislosti ztrát snímače 1 na výšce hladiny má chybu linearit 8 % (největší odchylka skutečného měřicího signálu od uvažovaného lineárního průběhu závislosti měřicího signálu na výšce hladiny). Citlivost snímače 1 byla vypočítána pomocí MS Excel, který v sobě má implementovanou funkci lineární regrese metodou nejmenších čtverců, rovnice uvedena v grafu (Obrázek 3.17) podle vztahu 3.6. Citlivost  $K$  zlinearizovaného snímače 1 je 0,0007.

Chyba linearity  $\delta_L$  je dána odchylkou od ideální lineární charakteristiky. Pro analogový signál je udána vztahem (3.5): [1]

$$\delta_L = \left( \frac{y_N - y_L}{y_{\max} - y_{\min}} \right)_{\max}, \quad [-] \quad (3.5) [1]$$

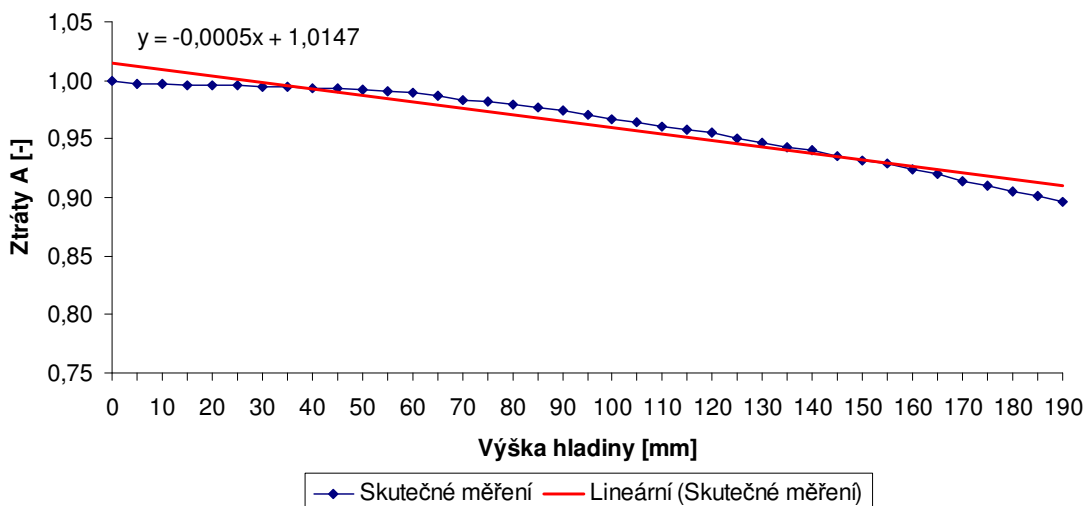
kde  $y_L$  je definována ideální lineární funkcí (3.6),  $y_N$  je hodnota největšího rozdílu mezi změřenou charakteristikou a  $y_L$ ,  $y_{\max}$  je horní mez měřeného rozsahu,  $y_{\min}$  je dolní mez měřeného rozsahu. Chyba linearity se též může uvádět jako absolutní procentuální hodnota. [1]

$$y_L = Kx_x \quad (y_L = Kx_x + y_0), \quad (3.6) [1]$$

kde  $K$  je citlivost snímače  $[-]$  a lze ji vypočítat lineární regresi metodou nejmenších čtverců,  $x_x$  je vstupní veličina,  $y$  je výstupní veličina a  $y_0$  je výstupní veličiny pro nulovou  $x_x$ . [1]

$$\delta_{L1} = \left( \frac{y_{N1} - y_{L1}}{y_{\max 1} - y_{\min 1}} \right)_{\max} = \left( \frac{1 - 1,0112}{1 - 0,86} \right)_{\max} \doteq \underline{\underline{-0,08}}$$

**Závislost ztrát mikroohybového snímače 2  
( $\Lambda = 5$  mm, prvek = 1 mm) na výšce hladiny**

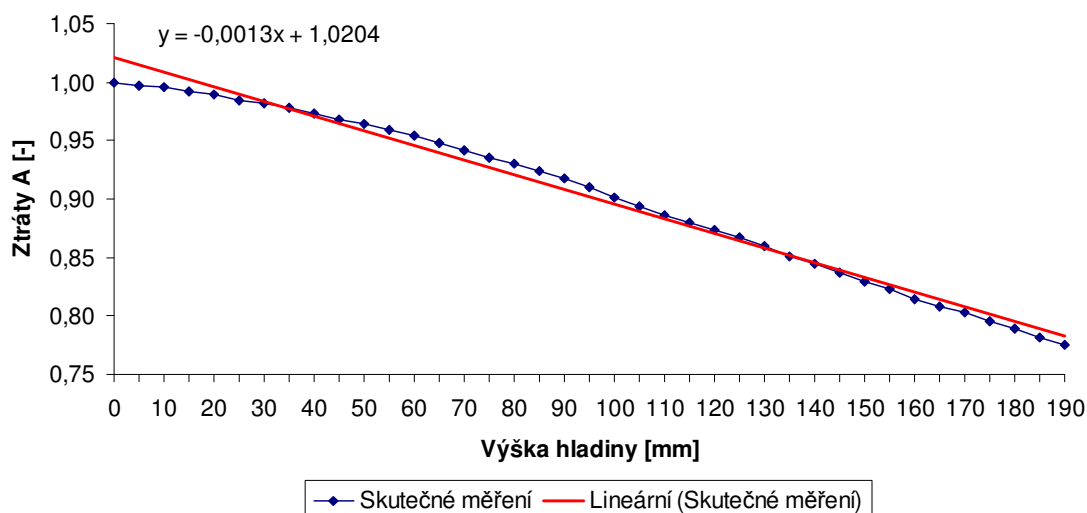


**Obrázek 3.18** Závislost ztrát mikroohybového snímače 2 na výšce hladiny.

Z grafu (Obrázek 3.18) je patrné, že na začátku charakteristiky snímač 2 téměř nereaguje na změnu výšky hladiny, a to až do výšky hladiny 55 mm. Z výpočtu podle vztahu 3.5 je zřejmé, že charakteristika závislosti ztrát snímače 2 na výšce hladiny má chybu linearity 22,64 %. Citlivost snímače 2 byla vypočítána pomocí MS Excel, který v sobě má implementovanou funkci lineární regrese metodou nejmenších čtverců, rovnice uvedena v grafu (Obrázek 3.18) podle vztahu 3.6. Citlivost  $K$  zlinearizovaného snímače 2 je 0,0005.

$$\delta_{L2} = \left( \frac{y_{N2} - y_{L2}}{y_{\max 2} - y_{\min 2}} \right)_{\max} = \left( \frac{0,8962 - 0,9197}{1 - 0,8962} \right)_{\max} \doteq \underline{\underline{-0,2264}}$$

### Závislost ztrát mikroohybového snímače 3 ( $\Lambda = 10$ mm, prvek = 2 mm) na výšce hladiny

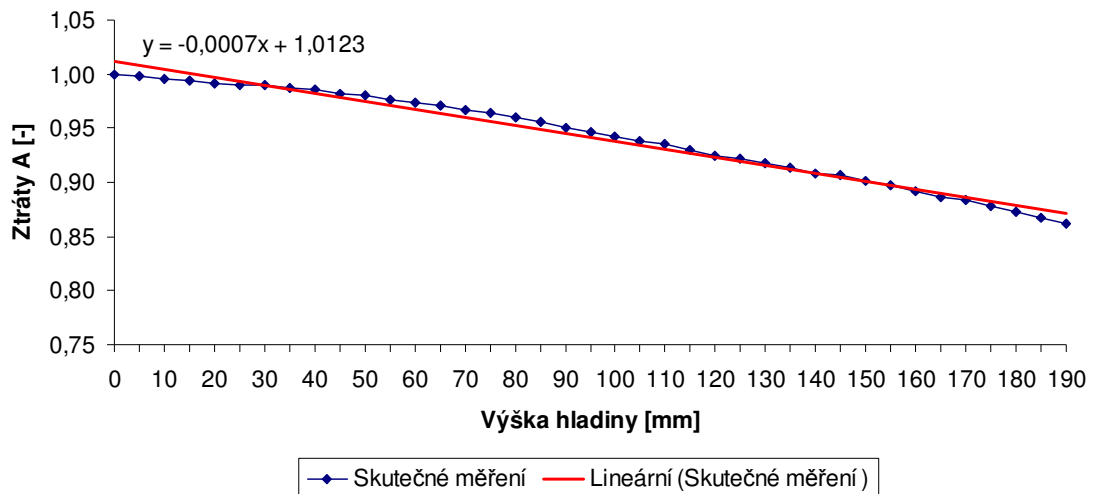


**Obrázek 3.19** Závislost ztrát mikroohybového snímače 3 na výšce hladiny.

Z grafu (Obrázek 3.19) a z výpočtu podle vztahu 3.5 je zřejmé, že charakteristika závislosti ztrát snímače 3 na výšce hladiny má chybu linearity 9,07 %. Citlivost snímače 3 byla vypočítána pomocí MS Excel, který v sobě má implementovanou funkci lineární regrese metodou nejmenších čtverců, rovnice uvedena v grafu (Obrázek 3.19) podle vztahu 3.6. Citlivost  $K$  zlinearizovaného snímače 3 je 0,0013.

$$\delta_{L3} = \left( \frac{y_{N3} - y_{L3}}{y_{\max 3} - y_{\min 3}} \right)_{\max} = \left( \frac{1 - 1,0204}{1 - 0,7752} \right)_{\max} \doteq \underline{\underline{-0,0907}}$$

**Závislost ztrát mikrohybového snímače 4  
( $\Lambda = 10$ , prvek = 1) na výšce hladiny**



**Obrázek 3.20** Závislost ztrát mikrohybového snímače 4 na výšce hladiny.

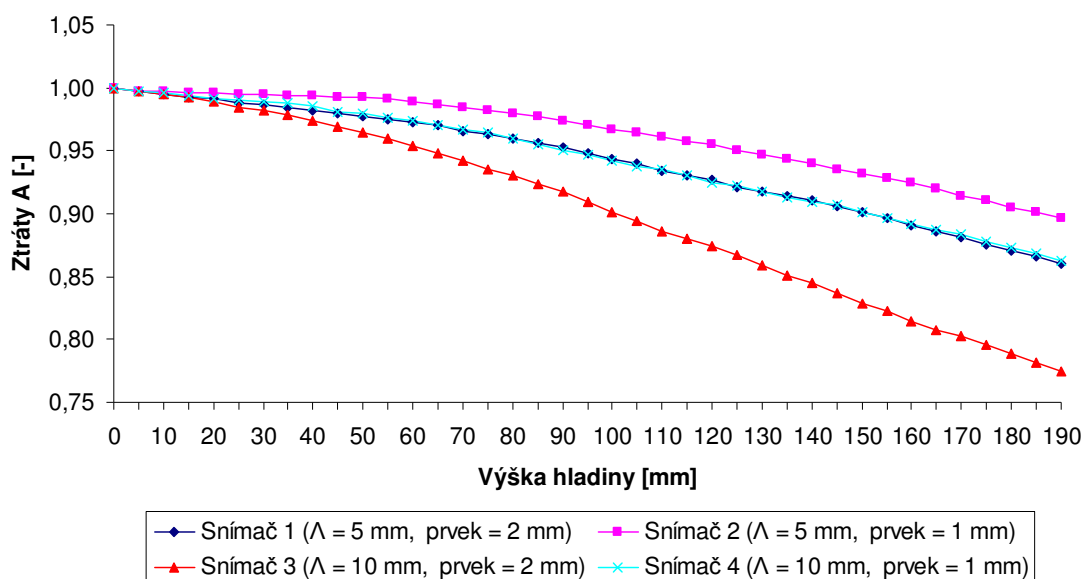
Z grafu (Obrázek 3.20) a z výpočtu podle vztahu 3.5 je zřejmé, že charakteristika závislosti ztrát snímače 4 na výšce hladiny má chybu linearitu 12,28 %. Citlivost snímače 4 byla vypočítána pomocí MS Excel, který v sobě má implementovanou funkci lineární regrese metodou nejmenších čtverců, rovnice uvedena v grafu (Obrázek 3.20) podle vztahu 3.6. Citlivost  $K$  zlinearizovaného snímače 4 je 0,0007.

$$\delta_{L4} = \left( \frac{y_{N4} - y_{L4}}{y_{\max 4} - y_{\min 4}} \right)_{\max} = \left( \frac{0,8624 - 0,8793}{1 - 0,8624} \right)_{\max} \doteq \underline{\underline{-0,1228}}$$

Z grafů (Obrázek 3.17-20) je patrné, že na citlivost snímače má vliv jak perioda deformačních prvků, tak i velikost deformačních prvků. Chyba linearitu je u snímačů do 10 % (u profesionálních snímačů běžně kolem 2 % a méně), kromě snímače 2, který má chybu linearitu přes 20 % (více uvedeno níže).

Na dalším grafu (Obrázek 3.21) je znázorněno porovnání závislostí ztrát jednotlivých mikrohybových snímačů na výšce hladiny.

### Porovnání závislosti ztrát mikroohybových snímačů na výšce hladiny



**Obrázek 3.21** Porovnání závislosti ztrát mikroohybových snímačů na výšce hladiny.

Z Grafu (Obrázek 3.21) je zjevné, že na citlivost snímače má vliv perioda deformačních prvků, protože u snímačů, kde byla perioda (5 mm) menší jak kritická (7 mm), nezáleželo až tak na velikosti deformačních prvků. Citlivost u těchto snímačů nebyla lepší ani přesto, že měli dvojnásobný počet deformačních prvků oproti snímačům s periodou (10 mm) větší jak kritickou. Navíc se zde projevila určitá necitlivost při měření malé výšky hladiny (hlavně u snímače 2), což ale mohlo být způsobeno tím, že vlákno hůře klouzalo přes deformační prvky a nedocházelo tak k deformaci vlákna úměrné k výšce hladiny. Toto mělo vliv na chybu linearity. U snímačů s periodou větší jak kritickou se při stejném počtu deformačních prvků projevila hlavně jejich velikost, s většími deformačními prvky byl snímač citlivější (snímač 3 byl nejcitlivější ze všech), což je patrné ve velikosti rozdílu mezi snímačem 3 a 4, zatímco při periodě menší jak kritické byl rozdíl mezi snímačem 1 a 2 třetinový. Správná velikost periody deformačních prvků se ukázala podstatnější než velikost deformačních prvků i jejich počet, snímač 4 měl při polovičním počtu deformačních prvků i menší velikosti prvků stejnou citlivost jako snímač 1, který měl ale periodu deformačních prvků menší než byla kritická perioda.

Na každém snímači bylo provedeno pět měření bezprostředně po sobě pro ověření opakovatelnosti měření (jestli se bude měřicí optické vlákno unavovat a pamatovat svoje deformace). Výsledky měření jsou viz. Tabulka 3.2-5, kde:

- $P_{o1}$  – výstupní výkon z jednotlivých snímačů při prvním měření,
- $P_{o2}$  – výstupní výkon z jednotlivých snímačů při druhém měření,
- $P_{o3}$  – výstupní výkon z jednotlivých snímačů při třetím měření,
- $P_{o4}$  – výstupní výkon z jednotlivých snímačů při čtvrtém měření,
- $P_{o5}$  – výstupní výkon z jednotlivých snímačů při pátém měření,
- $A_1$  – ztráty jednotlivých snímačů při prvním měření,
- $A_2$  – ztráty jednotlivých snímačů při druhém měření,
- $A_3$  – ztráty jednotlivých snímačů při třetím měření,
- $A_4$  – ztráty jednotlivých snímačů při čtvrtém měření,
- $A_5$  – ztráty jednotlivých snímačů při pátém měření.

Vypočtené závislosti ztrát pro jednotlivé snímače a jednotlivá měření jsou graficky zpracovány viz. Obrázek 3.22-25.

**Tabulka 3.2** Změřené a vypočtené hodnoty při opakovaném měření s mikroohybovým snímačem 1.

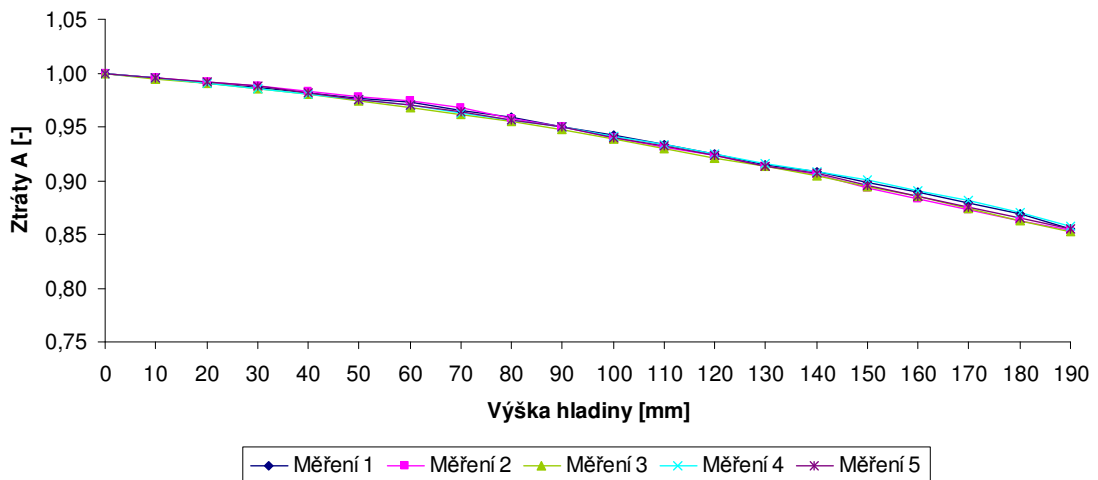
Výška hladiny [mm]	$P_{o1}$ [μW]	$P_{o2}$ [μW]	$P_{o3}$ [μW]	$P_{o4}$ [μW]	$P_{o5}$ [μW]	$A_1$ [-]	$A_2$ [-]	$A_3$ [-]	$A_4$ [-]	$A_5$ [-]
0	0,4563	0,4560	0,4560	0,4550	0,4550	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,4540	0,4541	0,4536	0,4528	0,4532	0,9950	0,9958	0,9947	0,9952	0,9960
20	0,4521	0,4523	0,4516	0,4509	0,4515	0,9908	0,9919	0,9904	0,9910	0,9923
30	0,4500	0,4503	0,4496	0,4485	0,4498	0,9862	0,9875	0,9860	0,9857	0,9886
40	0,4481	0,4483	0,4469	0,4461	0,4465	0,9820	0,9831	0,9800	0,9804	0,9813
50	0,4459	0,4460	0,4439	0,4440	0,4436	0,9772	0,9781	0,9735	0,9758	0,9749
60	0,4436	0,4440	0,4414	0,4412	0,4413	0,9722	0,9737	0,9680	0,9697	0,9699
70	0,4406	0,4410	0,4386	0,4382	0,4385	0,9656	0,9671	0,9618	0,9631	0,9637
80	0,4375	0,4368	0,4355	0,4354	0,4351	0,9588	0,9579	0,9550	0,9569	0,9563
90	0,4333	0,4330	0,4320	0,4325	0,4320	0,9496	0,9496	0,9474	0,9505	0,9495
100	0,4300	0,4286	0,4280	0,4280	0,4279	0,9424	0,9399	0,9386	0,9407	0,9404
110	0,4260	0,4248	0,4240	0,4246	0,4244	0,9336	0,9316	0,9298	0,9332	0,9327
120	0,4220	0,4208	0,4202	0,4206	0,4200	0,9248	0,9228	0,9215	0,9244	0,9231
130	0,4174	0,4162	0,4164	0,4167	0,4158	0,9147	0,9127	0,9132	0,9158	0,9138
140	0,4142	0,4128	0,4127	0,4135	0,4125	0,9077	0,9053	0,9050	0,9088	0,9066
150	0,4100	0,4070	0,4077	0,4096	0,4074	0,8985	0,8925	0,8941	0,9002	0,8954
160	0,4060	0,4026	0,4037	0,4052	0,4030	0,8898	0,8829	0,8853	0,8905	0,8857
170	0,4014	0,3982	0,3987	0,4013	0,3985	0,8797	0,8732	0,8743	0,8820	0,8758
180	0,3963	0,3935	0,3935	0,3960	0,3937	0,8685	0,8629	0,8629	0,8703	0,8653
190	0,3900	0,3891	0,3890	0,3900	0,3888	0,8547	0,8533	0,8531	0,8571	0,8545

Vzorový výpočet ztrát  $A_1$  podle (3.4) pro měření výšky hladiny 100 mm (Tabulka 3.2):



$$A_1 = \frac{P_{o1}}{P_{i1}} = \frac{0,4300}{0,4563} \doteq \underline{\underline{0,9424}}$$

**Opakovatelnost měření s mikroohybovým snímačem 1  
( $\Lambda = 5$  mm, prvek = 2 mm)**



**Obrázek 3.22** Opakovatelnost měření s mikroohybovým snímačem 1.

Z grafu (Obrázek 3.22) je patrné, že na ztráty snímače 1 neměla opakovaná měření prakticky žádný vliv i přesto, že byla perioda (5 mm) deformačních prvků menší než kritická perioda (7 mm). Toto bylo zřejmě důsledkem větších deformačních prvků, přes které není tak ostrý lom měřicího optického vlákna

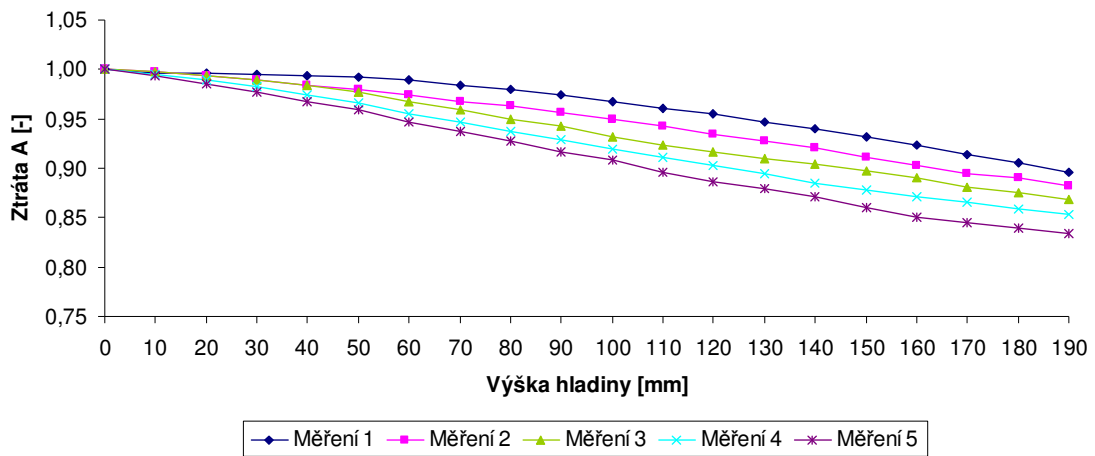
**Tabulka 3.3** Změřené a vypočtené hodnoty při opakovaném měření s mikroohybovým snímačem 2.

Výška hladiny [mm]	P <sub>o1</sub> [μW]	P <sub>o2</sub> [μW]	P <sub>o3</sub> [μW]	P <sub>o4</sub> [μW]	P <sub>o5</sub> [μW]	A <sub>1</sub> [-]	A <sub>2</sub> [-]	A <sub>3</sub> [-]	A <sub>4</sub> [-]	A <sub>5</sub> [-]
0	0,4750	0,4750	0,4743	0,4710	0,4680	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,4735	0,4736	0,4733	0,4686	0,4650	0,9968	0,9971	0,9979	0,9949	0,9936
20	0,4730	0,4720	0,4715	0,4660	0,4611	0,9958	0,9937	0,9941	0,9894	0,9853
30	0,4725	0,4703	0,4690	0,4626	0,4570	0,9947	0,9901	0,9888	0,9822	0,9765
40	0,4720	0,4676	0,4670	0,4592	0,4530	0,9937	0,9844	0,9846	0,9749	0,9679
50	0,4715	0,4652	0,4632	0,4549	0,4487	0,9926	0,9794	0,9766	0,9658	0,9588
60	0,4699	0,4631	0,4590	0,4501	0,4432	0,9893	0,9749	0,9677	0,9556	0,9470
70	0,4673	0,4598	0,4550	0,4461	0,4383	0,9838	0,9680	0,9593	0,9471	0,9365
80	0,4653	0,4577	0,4505	0,4417	0,4341	0,9796	0,9636	0,9498	0,9378	0,9276
90	0,4626	0,4543	0,4471	0,4373	0,4289	0,9739	0,9564	0,9427	0,9285	0,9165
100	0,4595	0,4510	0,4422	0,4330	0,4248	0,9674	0,9495	0,9323	0,9193	0,9077
110	0,4563	0,4475	0,4381	0,4290	0,4191	0,9606	0,9421	0,9237	0,9108	0,8955
120	0,4536	0,4440	0,4344	0,4250	0,4150	0,9549	0,9347	0,9159	0,9023	0,8868
130	0,4499	0,4407	0,4315	0,4210	0,4115	0,9472	0,9278	0,9098	0,8938	0,8793
140	0,4464	0,4371	0,4286	0,4170	0,4074	0,9398	0,9202	0,9036	0,8854	0,8705
150	0,4425	0,4330	0,4255	0,4135	0,4023	0,9316	0,9116	0,8971	0,8779	0,8596
160	0,4384	0,4289	0,4221	0,4100	0,3982	0,9229	0,9029	0,8899	0,8705	0,8509
170	0,4343	0,4250	0,4177	0,4074	0,3953	0,9143	0,8947	0,8807	0,8650	0,8447
180	0,4300	0,4226	0,4148	0,4045	0,3930	0,9053	0,8897	0,8746	0,8588	0,8397
190	0,4257	0,4193	0,4118	0,4018	0,3902	0,8962	0,8827	0,8682	0,8531	0,8338

Vzorový výpočet ztrát  $A_1$  podle (3.4) pro měření výšky hladiny 100 mm (Tabulka 3.3):

$$A_1 = \frac{P_{o1}}{P_{i1}} = \frac{0,4595}{0,4750} \doteq \underline{\underline{0,9674}}$$

### Opakovatelnost měření mikroohybovým snímačem 2 ( $\Lambda = 5 \text{ mm}$ , prvek 1 mm)



**Obrázek 3.23** Opakovatelnost měření s mikroohybovým snímačem 2.

Z grafu (Obrázek 3.23) je patrné, že na ztráty snímače 2 měla opakovaná měření značný vliv s tím, že únava měřicího optického vlákna se stále více zvětšovala. Toto je nejspíše důsledek velikosti periody deformačních prvků (5mm), která byla menší než kritická perioda (7 mm) a deformačních prvků, na kterých vznikl příliš ostrý lom. Protože toto se u snímače 1, který měl také periodu deformačních prvků menší než kritickou, ale větší deformační prvky (ohyb nebyl tak ostrý), neprojevalo.

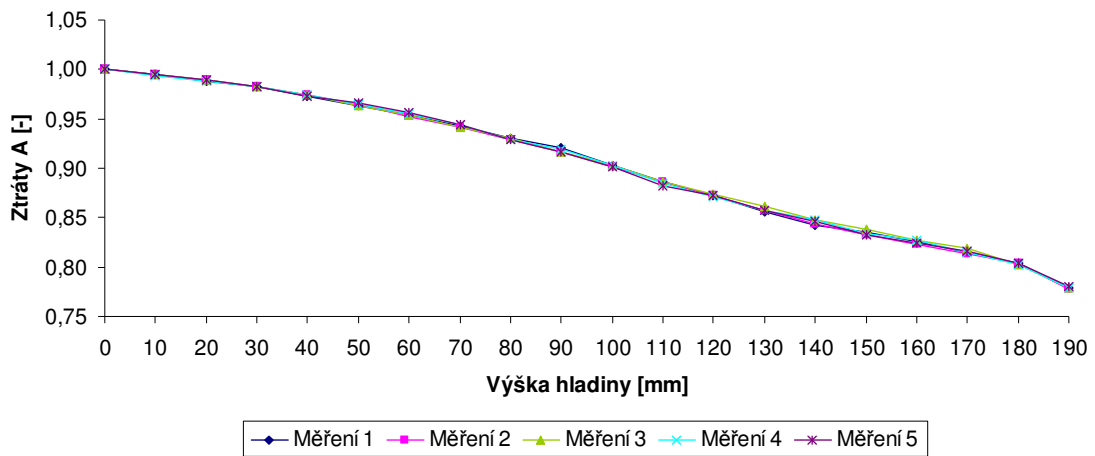
**Tabulka 3.4** Změřené a vypočtené hodnoty při opakovaném měření s mikroohybovým snímačem 3.

Výška hladiny [mm]	P <sub>o1</sub> [μW]	P <sub>o2</sub> [μW]	P <sub>o3</sub> [μW]	P <sub>o4</sub> [μW]	P <sub>o5</sub> [μW]	A <sub>1</sub> [-]	A <sub>2</sub> [-]	A <sub>3</sub> [-]	A <sub>4</sub> [-]	A <sub>5</sub> [-]
0	0,4577	0,4576	0,4578	0,4578	0,4576	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,4552	0,4552	0,4553	0,4551	0,4550	0,9945	0,9948	0,9945	0,9941	0,9943
20	0,4525	0,4525	0,4527	0,4526	0,4528	0,9886	0,9889	0,9889	0,9886	0,9895
30	0,4498	0,4498	0,4499	0,4498	0,4498	0,9827	0,9830	0,9827	0,9825	0,9830
40	0,4452	0,4458	0,4458	0,4458	0,4452	0,9727	0,9742	0,9738	0,9738	0,9729
50	0,4410	0,4413	0,4410	0,4418	0,4418	0,9635	0,9644	0,9633	0,9651	0,9655
60	0,4363	0,4360	0,4366	0,4373	0,4374	0,9532	0,9528	0,9537	0,9552	0,9559
70	0,4312	0,4309	0,4311	0,4319	0,4317	0,9421	0,9417	0,9417	0,9434	0,9434
80	0,4260	0,4251	0,4260	0,4252	0,4249	0,9307	0,9290	0,9305	0,9288	0,9285
90	0,4212	0,4192	0,4195	0,4206	0,4191	0,9203	0,9161	0,9163	0,9187	0,9159
100	0,4132	0,4126	0,4130	0,4131	0,4126	0,9028	0,9017	0,9021	0,9024	0,9017
110	0,4054	0,4055	0,4057	0,4053	0,4039	0,8857	0,8861	0,8862	0,8853	0,8826
120	0,3993	0,3991	0,3999	0,3990	0,3995	0,8724	0,8722	0,8735	0,8716	0,8730
130	0,3920	0,3921	0,3941	0,3928	0,3926	0,8565	0,8569	0,8609	0,8580	0,8580
140	0,3856	0,3862	0,3882	0,3878	0,3873	0,8425	0,8440	0,8480	0,8471	0,8464
150	0,3822	0,3812	0,3834	0,3819	0,3812	0,8350	0,8330	0,8375	0,8342	0,8330
160	0,3781	0,3766	0,3786	0,3787	0,3774	0,8261	0,8230	0,8270	0,8272	0,8247
170	0,3726	0,3723	0,3748	0,3731	0,3737	0,8141	0,8136	0,8187	0,8150	0,8167
180	0,3680	0,3677	0,3671	0,3675	0,3680	0,8040	0,8035	0,8019	0,8028	0,8042
190	0,3566	0,3560	0,3563	0,3564	0,3568	0,7791	0,7780	0,7783	0,7785	0,7797

Vzorový výpočet ztrát  $A_1$  podle (3.4) pro měření výšky hladiny 100 mm (Tabulka 3.4):

$$A_1 = \frac{P_{o1}}{P_{i1}} = \frac{0,4132}{0,4577} \doteq \underline{\underline{0,9028}}$$

**Opakovatelnost měření mikroohybovým snímačem 3**  
( $\Lambda = 10$  mm, prvek = 2 mm)



**Obrázek 3.24** Opakovatelnost měření s mikroohybovým snímačem 3.

Z grafu (Obrázek 3.24) je patrné, že na ztráty snímače 3 neměla opakovaná měření prakticky žádný vliv.

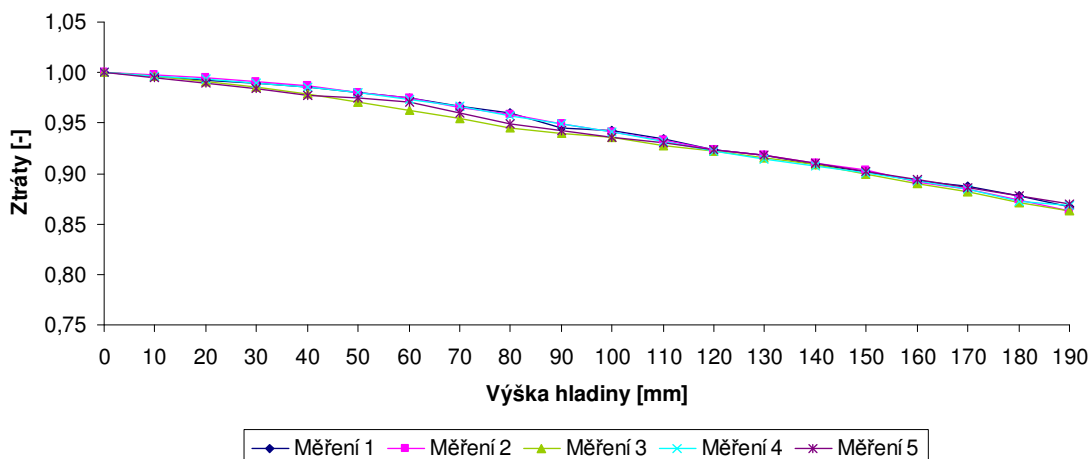
**Tabulka 3.5** Změřené a vypočtené hodnoty při opakovaném měření s mikroohybovým snímačem 4.

Výška hladiny [mm]	P <sub>o1</sub> [μW]	P <sub>o2</sub> [μW]	P <sub>o3</sub> [μW]	P <sub>o4</sub> [μW]	P <sub>o5</sub> [μW]	A <sub>1</sub> [-]	A <sub>2</sub> [-]	A <sub>3</sub> [-]	A <sub>4</sub> [-]	A <sub>5</sub> [-]
0	0,4586	0,4570	0,4569	0,4624	0,4623	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,4566	0,4560	0,4549	0,4605	0,4598	0,9956	0,9978	0,9956	0,9959	0,9946
20	0,4549	0,4544	0,4528	0,4591	0,4572	0,9919	0,9943	0,9910	0,9929	0,9890
30	0,4538	0,4529	0,4502	0,4577	0,4547	0,9895	0,9910	0,9853	0,9898	0,9836
40	0,4520	0,4511	0,4473	0,4554	0,4521	0,9856	0,9871	0,9790	0,9849	0,9779
50	0,4494	0,4480	0,4436	0,4531	0,4505	0,9799	0,9803	0,9709	0,9799	0,9745
60	0,4467	0,4452	0,4397	0,4500	0,4489	0,9741	0,9742	0,9624	0,9732	0,9710
70	0,4432	0,4414	0,4363	0,4469	0,4438	0,9664	0,9659	0,9549	0,9665	0,9600
80	0,4400	0,4380	0,4315	0,4429	0,4387	0,9594	0,9584	0,9444	0,9578	0,9490
90	0,4336	0,4340	0,4294	0,4388	0,4357	0,9455	0,9497	0,9398	0,9490	0,9425
100	0,4320	0,4301	0,4278	0,4352	0,4326	0,9420	0,9411	0,9363	0,9412	0,9358
110	0,4287	0,4266	0,4241	0,4310	0,4299	0,9348	0,9335	0,9282	0,9321	0,9299
120	0,4238	0,4220	0,4214	0,4265	0,4272	0,9241	0,9234	0,9223	0,9224	0,9241
130	0,4208	0,4198	0,4181	0,4230	0,4244	0,9176	0,9186	0,9151	0,9148	0,9180
140	0,4168	0,4160	0,4150	0,4193	0,4207	0,9089	0,9103	0,9083	0,9068	0,9100
150	0,4135	0,4126	0,4107	0,4165	0,4170	0,9017	0,9028	0,8989	0,9007	0,9020
160	0,4092	0,4076	0,4063	0,4125	0,4134	0,8923	0,8919	0,8893	0,8921	0,8942
170	0,4066	0,4040	0,4028	0,4090	0,4098	0,8866	0,8840	0,8816	0,8845	0,8864
180	0,4026	0,3992	0,3983	0,4037	0,4060	0,8779	0,8735	0,8717	0,8731	0,8782
190	0,3977	0,3945	0,3942	0,4016	0,4022	0,8672	0,8632	0,8628	0,8685	0,8700

Vzorový výpočet ztrát  $A_I$  pro měření výšky hladiny 100 mm (Tabulka 3.5):

$$A_I = \frac{P_{o1}}{P_{i1}} = \frac{0,4320}{0,4586} = \underline{\underline{0,9420}}$$

**Opakovatelnost měření mikroohybovým snímačem 4  
( $\Lambda = 10$  mm, prvek = 1 mm)**



**Obrázek 3.25** Opakovatelnost měření s mikroohybovým snímačem 4.

Z grafu (Obrázek 3.25) je patrné, že na ztráty snímače 4 neměla opakovaná měření prakticky žádný vliv. Zde je vidět, že při periodě větší než kritické nebyl ani při malých deformačních prvcích ohyb vlákna ostrý a na měření neměl žádný vliv.

Při delším měření maximální výšky hladiny (190 mm) mikroohybovým snímačem (snímač 3 – perioda deformačních prvků 10 mm, deformační prvek 2 mm) se projevovala únava vlákna. Za jednu hodinu klesl měřený výkon  $P_o$  o 0,01  $\mu$ W, což je zhruba desetina celého rozsahu snímače. Toto může být způsobeno jednoduchou konstrukcí mikroohybového snímače, který nemá žádné deformační prvky (Obrázek 2.19 a 2.20).

Při měření výšky hladiny pomocí reflexní sondy bylo možné vzhledem k použité sondě měřit rozmezí výšky hladiny od 150 mm do 195 mm. Změřené hodnoty výkonu a vypočtených ztrát reflexní sondy závislé na výšce hladiny viz. níže (Tabulka 3.6 a 3.7), kde  $P_{o1-10}$  jsou výkony z reflexní sondy pro měření 1 – 10 a  $A_{1-10}$  jsou ztráty pro měření 1 – 10 a grafické zpracování viz. Obrázek 3.26 a 3.27.

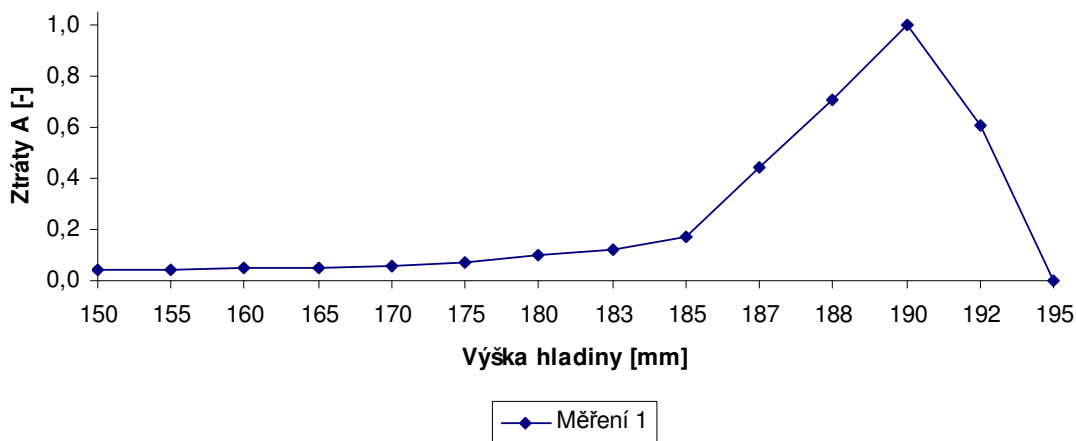
**Tabulka 3.6** Změřené a vypočtené hodnoty při kontinuálním měření výšky hladiny reflexní sondou pro měření 1 – 5.

Výška hladiny [mm]	P <sub>o1</sub> [nW]	P <sub>o2</sub> [nW]	P <sub>o3</sub> [nW]	P <sub>o4</sub> [nW]	P <sub>o5</sub> [nW]	A <sub>1</sub> [-]	A <sub>2</sub> [-]	A <sub>3</sub> [-]	A <sub>4</sub> [-]	A <sub>5</sub> [-]
150	14,0	14,0	14,0	14,3	14,1	0,0424	0,0419	0,0428	0,0429	0,0430
155	14,7	15,0	15,0	15,1	15,3	0,0445	0,0449	0,0459	0,0453	0,0466
160	17,1	17,0	16,9	17,1	17,1	0,0518	0,0509	0,0517	0,0514	0,0521
165	17,3	17,1	17,0	17,1	17,1	0,0524	0,0512	0,0520	0,0514	0,0521
170	19,0	19,0	19,1	19,0	19,2	0,0576	0,0569	0,0584	0,0571	0,0585
175	23,0	23,2	22,8	23,1	23,0	0,0697	0,0695	0,0697	0,0694	0,0701
180	33,0	33,0	33,0	33,1	33,0	0,1000	0,0988	0,1009	0,0994	0,1006
183	40,0	42,3	43,0	45,2	42,1	0,1212	0,1266	0,1315	0,1357	0,1284
185	57,4	55,0	56,3	57,0	56,7	0,1739	0,1647	0,1722	0,1712	0,1729
187	145,0	148,0	143,0	150,0	154,0	0,4394	0,4431	0,4373	0,4505	0,4695
188	233,0	240,0	223,0	228,0	243,0	0,7061	0,7186	0,6820	0,6847	0,7409
190	330,0	334,0	327,0	333,0	328,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
192	200,0	240,0	192,0	205,4	220,0	0,6061	0,7186	0,5872	0,6168	0,6707
195	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Vzorový výpočet ztrát  $A_i$  podle (3.4) pro měření výšky hladiny 188 mm (Tabulka 3.6), kde  $P_i$  odpovídá maximálnímu výkonu v daném měření:

$$A_1 = \frac{P_{o1}}{P_{i1}} = \frac{233}{330} \doteq \underline{\underline{0,7061}}$$

**Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny**



**Obrázek 3.26** Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny pro první měření.

Zbylé závislosti ztrát reflexní sondy na výšce hladiny pro měření 2 – 5 jsou uvedeny v Příloha 3.

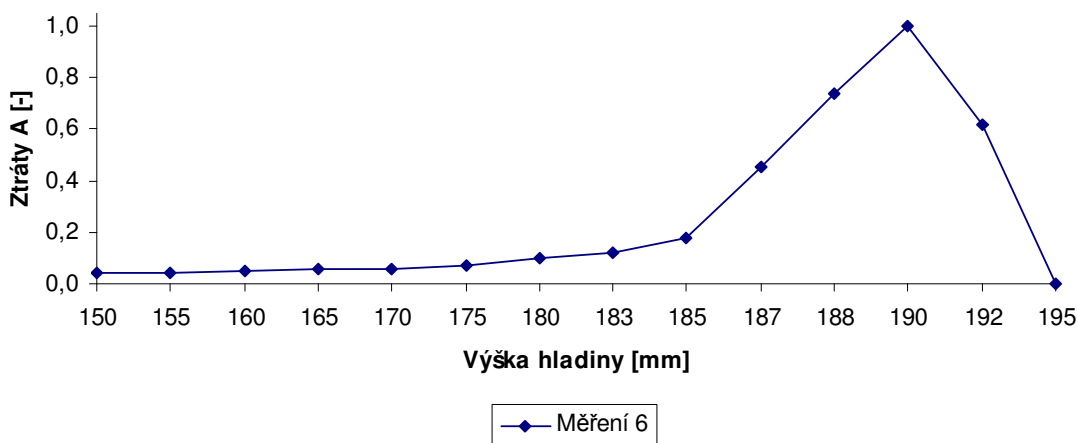
**Tabulka 3.7** Změřené a vypočtené hodnoty při kontinuálním měření výšky hladiny reflexní sondou pro měření 6 – 10.

Výška hladiny [mm]	$P_{o6}$ [nW]	$P_{o7}$ [nW]	$P_{o8}$ [nW]	$P_{o9}$ [nW]	$P_{o10}$ [nW]	$A_6$ [-]	$A_7$ [-]	$A_8$ [-]	$A_9$ [-]	$A_{10}$ [-]
150	14,0	14,3	14,3	14,0	14,1	0,0432	0,0433	0,0428	0,0429	0,0427
155	14,7	15,1	15,0	15,0	15,6	0,0454	0,0458	0,0449	0,0460	0,0473
160	17,0	16,8	17,1	17,0	17,1	0,0525	0,0509	0,0512	0,0521	0,0518
165	17,3	17,0	17,1	17,1	17,1	0,0534	0,0515	0,0512	0,0525	0,0518
170	19,3	19,0	19,1	19,0	19,0	0,0596	0,0576	0,0572	0,0583	0,0576
175	23,1	22,9	23,0	23,0	23,0	0,0713	0,0694	0,0689	0,0706	0,0697
180	32,8	33,0	33,1	33,0	32,8	0,1012	0,1000	0,0991	0,1012	0,0994
183	40,1	43,6	45,0	43,7	40,7	0,1238	0,1321	0,1347	0,1340	0,1233
185	57,4	55,8	57,0	57,4	56,8	0,1772	0,1691	0,1707	0,1761	0,1721
187	147,0	145,0	152,0	145,0	142,0	0,4537	0,4394	0,4551	0,4448	0,4303
188	240,0	220,0	234,0	240,0	219,0	0,7407	0,6667	0,7006	0,7362	0,6636
190	324,0	330,0	334,0	326,0	330,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
192	200,0	198,0	199,0	240,0	234,0	0,6173	0,6000	0,5958	0,7362	0,7091
195	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Vzorový výpočet ztrát  $A_l$  podle (3.4) pro měření výšky hladiny 188 mm (Tabulka 3.7), kde  $P_i$  odpovídá maximálnímu výkonu v daném měření:

$$A_l = \frac{P_{ol}}{P_{il}} = \frac{240}{324} \doteq \underline{\underline{0,7407}}$$

**Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny**



**Obrázek 3.27** Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny pro šesté měření.

Zbylé závislosti ztrát reflexní sondy na výšce hladiny pro měření 7 – 10 jsou uvedeny v Příloha 4.



Z grafu (Obrázek 3.26 a 3.27) je vidět závislost ztrát na výšce hladiny, přičemž nejvyšší výkon odpovídá asi 190 mm. S postupným zvyšováním výšky hladiny nad tuto mez výkon klesal až do 0 nW, což byl dotyk plováku s odrazovou plochou o reflexní sondu. Charakteristika je mírně zkreslená, protože v hodnotě výšky hladiny 190 mm nebyl samozřejmě tak ostrý zlom výkonu, ale spíše ohyb. Toto se ale při citlivosti sondy v této oblasti nepodaří změřit, protože jen těžko lze ručně zvyšovat výšku hladiny v měřené nádobě po desetínách mm.

Opakovatelnost měření byla odzkoušena změřením deseti po sobě jdoucích měření. Tím se ověřilo, že opakovatelnost měření byla velmi dobrá, jak je patrné z grafů pro další měření v příloze (Příloha 3 a 4).

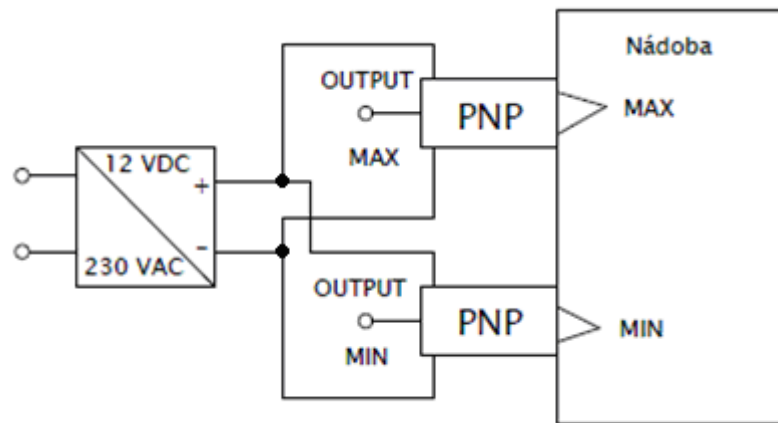
### 3.3 Snímač pro min/max měření výšky hladiny

Měření min/max hladiny bylo provedené pomocí profesionálních OVS s porušením okrajových podmínek firmy Baumer. Typ obou snímačů jak pro měření minimální hladiny, tak maximální hladiny, byl FFAK 17PTD1002/L (viz. Příloha 2) s možností nastavení citlivosti a signalizace sepnutí pomocí LED, které byly dodány vedoucím práce. Snímače pracují na principu porušení podmínky úplného vnitřního odrazu na rozhraní mezi vláknem a prostředím, ve kterém se nachází, kdy se při porušení úplného vnitřního odrazu spíná pomocí PNP tranzistoru výstup, a také LED (Obrázek 3.17).



**Obrázek 3.28** Snímač Baumer FFAK 17PTD1002/L.

Snímače mohou být napájeny stejnosměrným napětím 10 – 30 V, pro jejich napájení byl použit zdroj ELKO ZNP-10 (12 V DC). Zapojení snímačů viz. Obrázek 3.18.



**Obrázek 3.29** Zapojení snímačů měření min/max výšky hladiny.

Snímače byly umístěny přes stěnu do měřicí nádoby. Výška hladiny se indikovala pomocí rozsvěcení LED na příslušném snímači – minimální (ve výšce 20 mm ode dna nádoby) nebo maximální (60 mm ode dna nádoby) hladiny. Pro přesné zjištění výšky hladiny, při které snímače spínají, bylo na bok nádoby přilepeno měřidlo výšky.



**Obrázek 3.30** Realizace měření min/max hladiny.

### **3.3.1 Bodové měření (min/max)**

S tímto přípravkem bylo provedeno asi 50 měření s tím, že úspěšnost detekce přítomnosti vody v měřených výškách (min/max) bylo vždy 100%. Rozmezí výšky spínání bylo u obou výšek (min/max) maximálně dva mm nad požadovanou výškou (20 mm, 60 mm), což bylo způsobeno spíše rychlostí ukončení přilévání vody do nádoby. Toto bylo očekávatelné vzhledem k použitým snímačům typu FFAK 17PTD1002/L firmy Baumer, které jsou určeny pro profesionální detekci výšky hladiny v průmyslové praxi, kde musí splňovat přísné požadavky na dlouhou životnost a spolehlivost.

## 4 ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

Za pomoci vytvořených přípravků by měla vzniknout laboratorní úloha do předmětu *Optoelektronické snímače* pro měření výšky hladiny.

### 4.1 Název – Měření výšky hladiny

#### 4.1.1 Úvod

Cílem této laboratorní úlohy je seznámit se s měřením výšky hladiny, a to jak kontinuálního, tak i bodového (min/max) pomocí optických vláknových senzorů (OVS) založených na různých principech.

#### 4.1.2 Zadání

1. Změřte výšku hladiny pomocí přípravku s mikroohybovým snímačem v rozmezí 0 – 190 mm (krok měření 5 mm). Použijte snímače s velikostí deformačního prvku 1 a 2 mm a s rozložením deformačních prvků 5 a 10 mm. Vypočtěte a vynesete do grafů ztráty snímače závislé na výšce hladiny. Ověřte opakovatelnost snímačů při 5 měřeních v rozmezí 0 – 190 mm (krok měření 10 mm), která následují bezprostředně po sobě. Výsledky měření zhodnoťte.

2. Změřte výšku hladiny pomocí přípravku s reflexní sondou v rozmezí 150 – 195 mm. Vypočtěte a vynesete do grafů ztráty snímače závislé na výšce hladiny. Krok měření volte tak, abyste co nejlépe vystihly závislost ztrát sondy na výšce hladiny. Ověřte opakovatelnost sondy při 5 měřeních v rozmezí 150 – 195 mm, která následují bezprostředně po sobě. Výsledky měření zhodnoťte.

3. Změřte při jaké výšce snímače indikují přítomnost kapaliny při min/max měření výšky hladiny pomocí přípravku se snímači s porušením okrajových podmínek. Měření zopakujte minimálně 5x a zjistěte přesnost spínání pro jednotlivé výšky hladiny.

4. Podle rozdělení OVS v teoretickém rozboru určete jednotlivé typy použitých OVS.

#### 4.1.3 Použité přístroje

Zdroj optického záření Noyes OLS1

Měřič optického výkonu Noyes OPM4

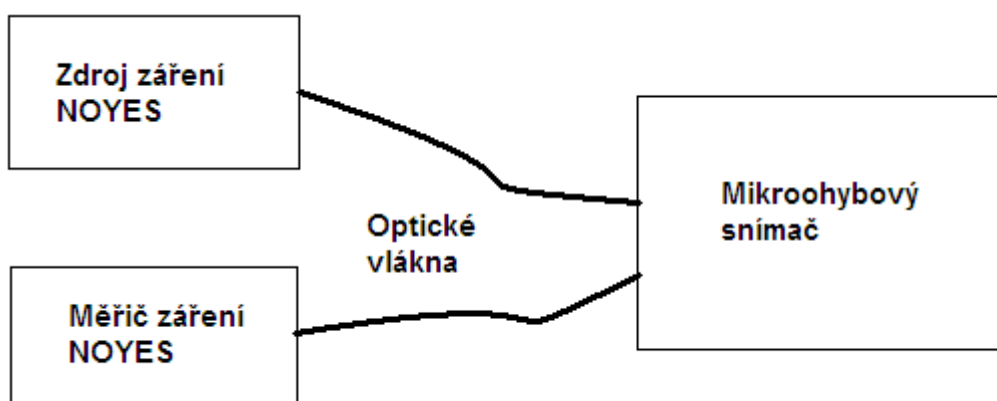
Zdroj optického záření PROMAX PROLITE – 81

Měřič výkonu MIKROKOM LM-1

Přípravek s reflexní sondou a mikroohybovým snímačem  
Přípravek se snímači s porušením okrajových podmínek  
Destičky mikroohybového snímače  
Optická vlákna  
Optické vlákno holé  
Optické spojky  
Technická dokumentace k použitým přístrojům

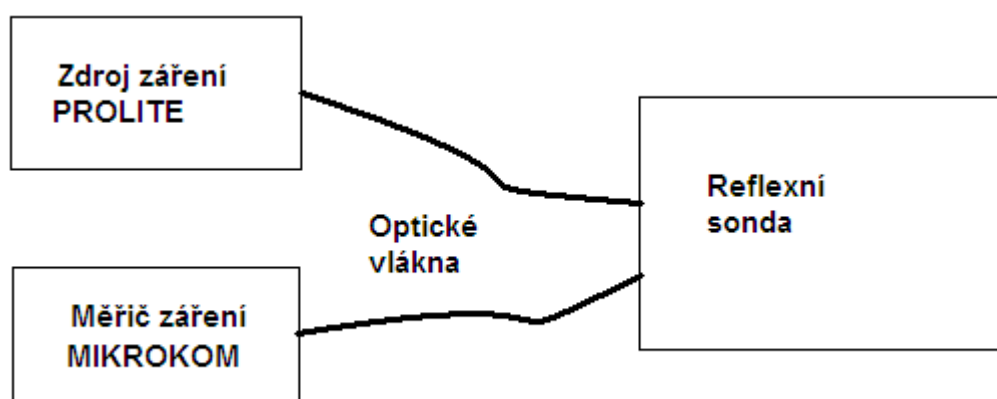
#### 4.1.4 Blokové schéma

Blokové schéma pro měření 1.



Obrázek 4.1 Blokové schéma pro měření 1.

Blokové schéma pro měření 2.



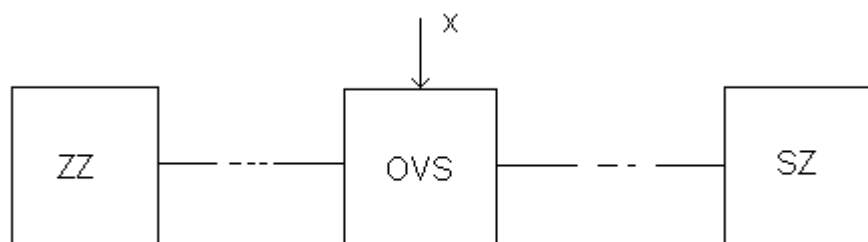
Obrázek 4.2 Blokové schéma pro měření 2.

## 4.1.5 Teoretický rozbor

Optické vláknové snímače (OVS) vznikly koncem 60. let minulého století, což v podstatě odpovídá době vzniku prvních optických vláken použitelných v praxi. Pomocí OVS lze dnes měřit v podstatě všechny fyzikální veličiny, ale i přesto u nich v minulých desetiletích nedocházelo k tak masivnímu rozšíření, které bylo z počátku předpokládáno. Hlavním důvodem menšího rozšíření proti klasickým snímačům bývala většinou vyšší cena. Toto přestává platit během posledních dvou desetiletí, kdy se výrazně zkvalitnily a rozšířily technologické postupy při výrobě optických vláken. Tyto změny umožnily běžně vyrábět speciální vlákna pro měřicí techniku (specifické profily indexu lomu vláken, Braggovy mřížky, speciální pláště vláken atd.), které mají vliv na stále častější používání optických vláken v oblasti měření. Jsou však oblasti, kde jsou OVS nenahraditelné (např. hydrofony a gyroskopy), protože ostatní snímače nedosahují v daných oblastech měření tak dobrých parametrů (vysokou citlivost, necitlivostí vůči vnějšímu rušení, vysokým izolačním odporem atd.). Toto je způsobeno zcela odlišným fyzikálním charakterem nosičů informací měřené veličiny (fotony), a také z rozdílného rozsahu interakce vlnové délky optického záření s měřenou veličinou. [2], [8], [9], [11]

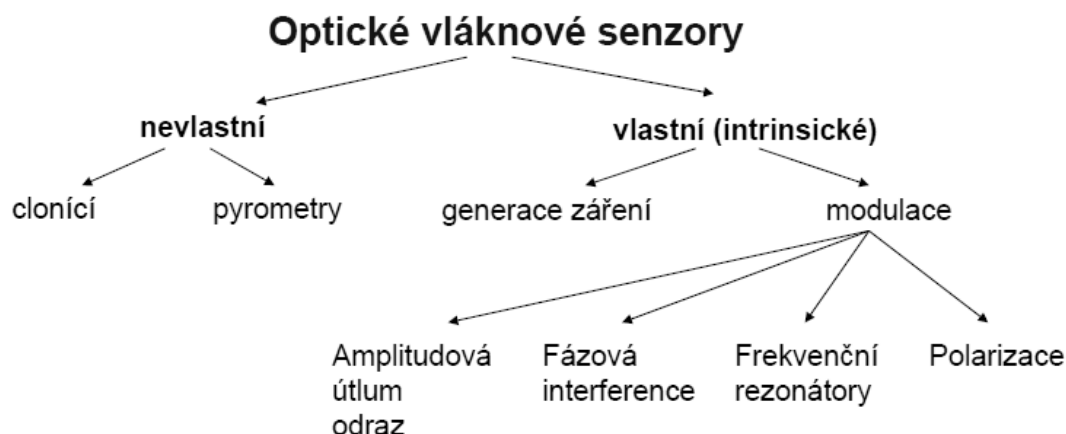
Základním principem je, že měřená fyzikální veličina  $x$  působí na OVS prostřednictvím změny indexu lomu optického vlákna  $n$ , absorpcí  $a$  nebo emisí  $e$ . [2]

Základní blokové schéma optického měřicího kanálu, které tvoří zdroj optického záření (ZZ) - nejčastěji luminiscenční dioda (nekoherentní zdroj záření) nebo laserová dioda (koherentní zdroj záření), snímač optického záření (SZ) - nejčastěji fotodioda, PIN dioda nebo lavinová dioda a OVS, je na Obrázek 4.3. Vzájemně jsou tyto základní části propojeny optickým vláknem. [2]



**Obrázek 4.3** Základní blokové schéma optického měřicího kanálu. [2]

OVS jsou v podstatě rozděleny do dvou základních skupin podle způsobu použití optického vlákna. První skupina představuje vlastní vláknové optické senzory a druhá skupina zahrnuje nevlastní optické vláknové senzory.



**Obrázek 4.4** Dělení OVS. [1]

Vlastní OVS – měřená veličina ovlivňuje přenos světla přímým působením na optické vlákno (např. OVS s amplitudovou modulací změnou útlumu vlákna mikroohyby). Optické vlákno je zde snímacím prvkem.

Nevlastní OVS – používají optické vlákna pouze k přenosu záření od zdroje záření k místu působení měřené veličiny a odtud k snímači záření. Zde je do vlákna vložen prvek, který moduluje optický signál, jenž přes něj prochází (např. senzor polohy clonící světelný tok přiváděný svazkem optických vláken k optickému senzoru). Tyto OVS se používají hlavně v pyrometrii v oblasti infračerveného záření. Optické vlákno je zde jako prostředek pro předávání signálu.

Amplitudový (intenzitní) OVS je nejrozšířenějším typem OVS, který využívá amplitudovou modulaci měřenosného signálu. Amplitudová modulace optického signálu se může uskutečnit: [2], [3], [5]

- změnou tlumení (přímým zeslabením světla),
- změnou přechodu a odrazu (např. přerušením optického vlákna a vzájemným pohybem jeho konců),
- porušením okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí,
- změnou vzájemné vazby světlovodů,
- generací záření.

Fázové OVS jsou nejcitlivější optické vláknové snímače, které jsou založené na fázové modulaci světelné vlny šířící se optickým vlákem. Tyto změny se měří interferometrickými metodami, lze měřit fáze od  $10^{-8}$  rad. Snímaná veličina způsobuje změnu fáze světelné vlny prostřednictvím změny délky, indexu lomu a průřezu

optického vlákna. Jako základ konstrukce fázových OVS se používají optické vláknové interferometry. [2], [3], [5]

Polarizační OVS – existuje díky použití modulace optického signálu v optickém vlákně velké množství rozdílných konstrukcí s různou citlivostí. [2], [3], [5]

Polarizační OVS využívají následujících fyzikálních jevů:

- Faradayův magnetický jev
- Kerrův jev
- Elektropyretický jev
- Pockelsův jev
- Fotoelastický jev
- optickou aktivitu roztoku

Polarizační OVS se dělí na:

- senzory s modulací otočení roviny polarizace,
- senzory s indukovaným dvojlomem.

U OVS pro měření výšky hladiny se využívají podobné měřicí principy jako u OVS pro měření např. tlaku, teploty, průtoku, polohy nebo posunutí. Snímání výšky hladiny může být prováděno buď formou přepínačů (bodové měření, např. min/max úroveň měření) nebo jako kontinuální měření.

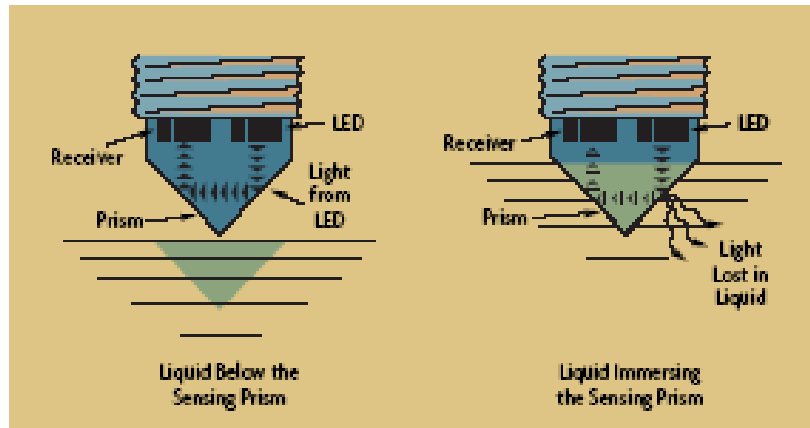
OVS jsou vhodné pro aplikace měření výšky hladiny kapalin, zejména v oblastech, kde je odolnost proti elektromagnetickým rušením (EMI) a elektrická izolovanost nezbytně nutná, např. sledování hladiny v nádržích s ropou, kde je atmosféra v blízkosti nádrží s ropou hořlavá, a proto jakákoli elektrická jiskra může způsobit závažnou katastrofu. [4]

Nejčastější typy OVS používané pro měření výšky hladiny jsou:

- snímače s přerušným optickým vláknem
- snímače s porušením okrajových podmínek
- reflexní sondy
- snímače založené na mikroohybech

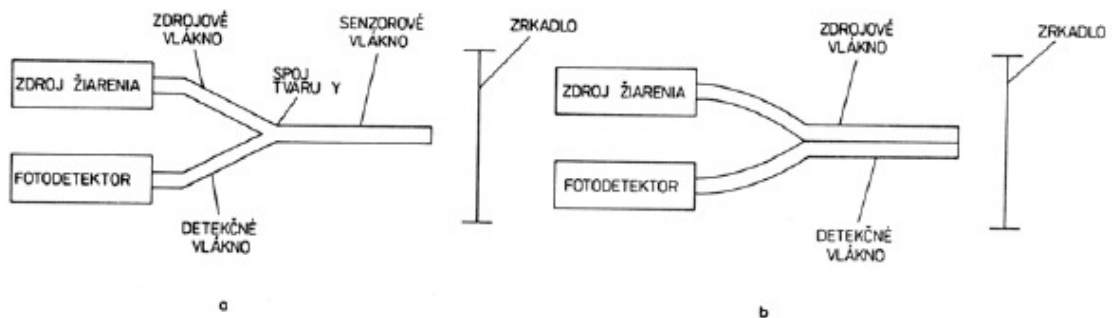
Snímače s porušením okrajových podmínek využívají porušení podmínky úplného vnitřního odrazu (např. na rozhraní mezi jádrem a pláštěm optického vlákna).





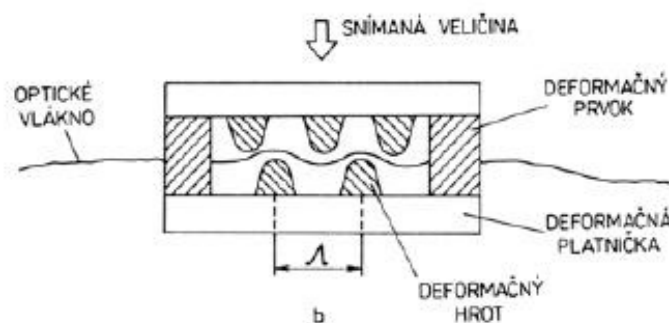
**Obrázek 4.5** Snímač přítomnosti kapaliny s porušením okrajových podmínek. [15]

U reflexních snímačů (sond) má optické vlákno zároveň funkci vstupu i výstupu optického signálu. Vazba mezi vstupním a výstupním vláknem se uskutečňuje odrazem od pohyblivé odrazové plochy (zrcadlo), která je vychylována měřenou veličinou. Výhodou sond je jejich jednoduchá výroba. [5] Ukázka jednovláknové a dvouvláknové reflexní sondy je na Obrázku 4.5.



**Obrázek 4.6** Reflexní sondy: a) jednovláknová, b) dvouvláknová. [3]

Mikroohybové snímače (Obrázek 4.7) měří pokles intenzity signálu vystupujícího z konce jádra snímacího optického vlákna. Snímací vlákno je vlivem měřené veličiny působící na destičku ohýbáno mezi deformačními zuby umístěnými na destičkách a intenzita světla se tím snižuje. Toto platí pro měření vidů ve světlém poli nebo se měří nárůst intenzity světla, které vlivem mikroohybů uniká přes plášť do okolního prostředí (měření v tmavém poli). [5]



**Obrázek 4.7** Princip snímače založeném na mikroohybech. [3]

Mikroohybové snímače měření výšky hladiny jsou založené na převodu výšky hladiny na měření tlaku, kdy se vlivem změn tlaku závislých na výšce měřené hladiny mění velikost deformace měřícího optického vlákna pohybem horní destičky s deformačními hroty proti hrotům na pevné spodní destičce.

#### 4.1.6 Postup měření

Ad 1) Měření provedte pomocí přípravku s reflexní sondou a mikroohybovým snímačem. Přes mikroohybové destičky, které umístíte do přípravku, protáhněte dvojitě holé měřicí vlákno. Pro měření pomocí mikroohybového snímače použijte zdroj optického záření Noyes OLS1 a měřič optického výkonu Noyes OPM4 na vlnové délce 850 nm. Blokové schéma zapojení měření je na Obrázek 4.1. Výšku hladiny měřte od 0 – 190 mm po 5 mm pro jednotlivé mikroohybové destičky. Změřte hodnoty vstupního výkonu  $P_i$ , výstupního výkonu  $P_o$  a vypočtete hodnotu optických ztrát  $A$  podle vztahu (4.1):

$$A = \frac{P_o}{P_i} \quad [-] \quad (4.1) [7]$$

Dále provedte 5 měření v rozmezí 0 – 190 mm (krok měření 10 mm), která následují bezprostředně po sobě pro ověření opakovatelnosti snímače.

Ad 2) Měření provedte pomocí přípravku s reflexní sondou a mikroohybovým snímačem. Pro měření pomocí reflexní sondy použijte zdroj optického záření PROMAX PROLITE – 81 a měřič výkonu MIKROKOM LM-1. Blokové schéma zapojení měření je na Obrázek 4.2. Reflexní sondou měřte výšku hladiny až od 150 – 195 mm, kroky měření zvolte tak, abyste byly schopni ze změřených hodnot co nejpřesněji vykreslit závislost ztrát sondy na výšce hladiny. Změřte hodnoty výkonu  $P_i$ ,  $P_o$  a vypočtete hodnotu optických ztrát  $A$  podle vztahu (4.1). Dále provedte 5 měření v rozmezí 150 – 195 mm (krok měření viz. výše), která následují bezprostředně po sobě

pro ověření opakovatelnosti sondy. Nezapomeňte, že výška měřená reflexní sondou je o 10 mm nižší (výška plováku).

Ad 3) Měření provedte pomocí přípravku se snímači s porušením okrajových podmínek. Přípravek se snímači připojte pouze pod napájení. Změřte při jaké výšce snímače indikují přítomnost kapaliny, a to jak pro minimální, tak i maximální výšku hladiny. Toto měření zopakujte minimálně 5x a zjistěte přesnost spínání pro jednotlivé výšky hladiny.

### **4.1.7 Závěr**

Studenti si v tomto laboratorním cvičení vyzkouší práci s různými typy optických vláknových snímačů pro měření výšky hladiny, a to jak kontinuální, tak i bodové (měření min/max).

V teoretickém rozboru jsou uvedeny základy o OVS a jejich dělení. Podrobněji jsou popsány OVS používané v tomto laboratorním cvičení.

## 5 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala měřením výšky hladiny pomocí OVS a měla čtyři cíle. Provést lineární rešerši o OVS. Dále návrh a realizace přípravků s OVS pro kontinuální a bodové (min/max) měření výšky hladiny. V poslední části pak navrhnout zadání laboratorní úlohy s využitím přípravků pro předmět *Optoelektronické snímače*.

V první části práce (Kapitola 2) jsou pro získání uceleného přehledu o daném tématu popsány základní pojmy týkající se problematiky OVS, včetně základních rozdělání a typů OVS, u kterých jsou vysvětleny jejich principy. Je zde uveden přehled OVS pro měření výšky hladiny, a poté popsány metody měření výšky hladiny pomocí OVS.

V další části práce (Kapitola 3) je popsán návrh přípravku s OVS pro kontinuální měření výšky hladiny, který umožňuje demonstraci různých principů OVS, a to měření pomocí snímače založeného na mikroohybech a pomocí snímače založeného na odrazech (reflexní sondy). Rozsahy měření jsou bohužel rozdílné pro oba principy. Měření výšky hladiny pomocí mikroohybového probíhá v plném rozsahu výšky hladiny v měřicí nádobě (0 – 190 mm), zatímco měření pomocí reflexní sondy probíhá pouze v rozsahu od 150 – 195 mm. Rozsah měření u reflexní sondy je omezen typem sondy, která byla pro měření k dispozici. Přípravek je také zrealizován. V Kapitole 3.2.3 je popsáno měření s tímto přípravkem, změřeny a vypočteny závislosti ztrát pro oba snímače. Pro oba snímače je zde uvedena opakovatelnost měření. U mikroohybového snímače je navíc vypočtena chyba linearitativity snímače a citlivost. Dále je zde navržen přípravek pro max/min měření výšky hladiny s využitím snímačů s porušením okrajových podmínek. Přípravek je také zrealizován. V Kapitole 3.3.1 je popsáno měření s tímto přípravkem. Navržené přípravky se dají použít pro měření v laboratoři optoelektroniky.

V poslední části (Kapitola 4) je proveden návrh zadání laboratorní úlohy do předmětu *Optoelektronické snímače*, kde se navržená úloha zabývá kontinuálním a bodovým (min/max) měřením výšky hladiny pomocí vytvořených měřicích přípravků.

Pokračováním této práce by mělo být samotné nasazení přípravků do výuky v laboratoři optoelektroniky a měření podle uvedené laboratorní úlohy v kapitole 4. Dále by bylo vhodné zajistit jiný typ reflexní sondy, která by umožňovala měření výšky hladiny v plném rozsahu výšky měřené nádoby.

# Literatura

- [1] ĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [2] BEJČEK, L. *Vláknová optika v řídicí a měřicí technice*. Skripta VUT Brno, 2002.
- [3] TURÁŇ, J., PETRÍK, S. *Optické vláknové senzory*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1990. ISBN 80-05-00655-1.
- [4] GAO, J. Z., ZHAO, Y. L., JIANG, Z. D. Design and performance characterization of a fibre optical sensor for liquid level monitoring. *Journal of Physics: Conference Series*, 2005, volume 13, issue 1, s. 77–80. doi: 10.1088/1742-6596/13/1/018
- [5] BEJČEK, L. *Optoelektronické snímače*. Skripta VUT Brno, 2009.
- [6] KUANG, J. H., CHEN, P. CH., CHEN, Y. CH. Plastic optical fiber displacement sensor based on dual cycling bending. *Sensors*, 2010, vol. 10, issue 11, s. 10998–10210. ISSN 1424-8220.
- [7] MARŠÁLEK, L. *Optická vlákna*. Verze 2.1.3. Ostrava: VŠB, 2006.
- [8] RUŽIČKA, R. *Optická vlákna jako snímače teplot a deformací a jejich aplikace v chytrých konstrukcích*. Praha: ČVUT, 2006.
- [9] HANÁČEK, F., LÁTAL, J., SKAPA, J., VAŠINEK, V., KOUDELKA, P., ŠIŠKA, P., *Vláknově optické senzory – hudba budoucnosti*. *Automatizace*, 2009, roč. 52, č. 10, s. 577–579. ISSN 0005-125X
- [10] BEJČEK, L., ŠEDIVÁ, S. *Vláknová optika v automatizaci – návody do laboratorních cvičení*. Skripta VUT Brno, 2004.
- [11] HANÁČEK, F., LÁTAL, J., KOUDELKA, P., *Využití optického vlákna jako vláknově optického senzoru*. *Sdělovací technika*, 2009, roč. 57, č. 9, s. 17–19. ISSN 0036-9942.
- [12] WIKIPEDIA. *Optické vlákno* [online]. 2011-5-5. [cit. 2011-5-6].  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Optické\\_vlákno](http://cs.wikipedia.org/wiki/Optické_vlákno)>
- [13] HONEYWELL. *Fiber Optics and Liquid Level Sensore Line Guide* [online]. 2008-6. [cit. 2011-5-6].  
<[http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci\\_id/147864/la\\_id/1/document/1/re\\_id/0](http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/147864/la_id/1/document/1/re_id/0)>
- [14] AVANTES BV. *Fiber optics* [online]. [cit. 2011-5-6].  
<[http://www.avantes.com/Fiber-Optics/View-all-products.html?DescOrderBy=ASC&orderby=product\\_cdate](http://www.avantes.com/Fiber-Optics/View-all-products.html?DescOrderBy=ASC&orderby=product_cdate)>
- [15] OMEGA. *Zpravodaj pro oblast měření a regulace - číslo 4: Měření průtoku a Měření výšky hladiny*. [cit. 2011-5-10].  
<[http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo\\_4.pdf](http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_4.pdf)>

# Seznam symbolů a zkratek

$Q$	Modulační index	[-]
$\Delta P$	Změna optického výkonu	[W]
$\Delta I$	Změna optické intenzity	[W.m <sup>-2</sup> ]
$P_0$	Optický výkon bez působení měřené veličiny $x$	[W]
$I_0$	Optická intenzita bez působení měřené veličiny $x$	[W.m <sup>-2</sup> ]
$q_s$	Citlivost snímače záření	[A.W <sup>-1</sup> ]
$S$	Citlivost (strmost) snímače	[A.Ω]
$R_z$	Zatěžovací odpor snímače záření	[Ω]
$x_{min}$	Práh citlivosti (rozlišení)	[-]
$NA$	Numerická apertura	[-]
$n_1$	Index lomu jádra	[-]
$n_2$	Index lomu pláště	[-]
$P_o$	Optický výkon vstupující do vlákna	[W]
$P_i$	Optický výkon vystupující z vlákna	[W]
$\Delta$	Poměrný rozdíl indexu lomu mezi jádrem a pláštěm optického vlákna	[-]
$\theta_a$	Vrcholový úhel	[°]
$e$	Náboj elektronu	[C]
$B$	Šířka frekvenčního pásma	[Hz]
$K$	Konstanta	[-]
$D(t)$	Velikosti mikroohybů	[m]
$L$	Délka vláken jen mezi deformačními prvky destičky	[m]
$q$	Perioda rozestupu deformačních prvků	[m]
$\alpha$	Součinitel zeslabení	[-]
$\Delta\beta$	Konstanta šíření	[-]
$L_o$	Perioda mezi deformačními prvky	[m]
$L_c$	Kritická perioda mezi deformačními prvky	[m]
$\zeta$	Konstanta v závislosti na indexu lomu vlákna	[-]
$M$	Celkový počet vidů	[-]
$m$	Číslo vidu	[-]
$a$	Poloměr jádra vlákna	[m]
$A$	Ztráty optického vlákna	[-]
$x$	Měřená veličina (obecně)	[-]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[-]
$\lambda$	Vlnová délka světla	[m]
$\alpha_r$	Koeficient ohybových ztrát	[-]
$c_{1,2}(R)$	Konstanta nezávislá na zakřivení	[-]
$R$	Poloměr zakřivení	[m]

$R_c$	Kritický poloměr zakřivení	[m]
$\delta_L$	Chyba linearity	[-]
$y_N$	Největší rozdíl mezi změřenou charakteristikou a její linearizací	[-]
$y_L$	Hodnota linearizace pro $y_N$	[-]
$y_{max}$	Horní mez měřeného rozsahu	[-]
$y_{min}$	Dolní mez měřeného rozsahu	[-]
$K$	Citlivost zlinearizovaného snímače	[-]
$n$	Počet kroků měření	[-]
$x_x$	Vstupní veličina (obecně)	[-]
$y$	Výstupní veličina (obecně)	[-]
$y_0$	Výstupní veličina v nulové hodnotě $x_x$ (obecně)	[-]

# Seznam příloh

Příloha 1. HRBR – RXYYYZ Series (POF) Data sheet

Příloha 2. Liquid level and leakage sensors FFAK 17PTD1002/L

Příloha 3. Závislosti ztrát reflexní sondy na výšce hladiny pro měření 2 – 5

Příloha 4. Závislosti ztrát reflexní sondy na výšce hladiny pro měření 7 – 10



## Příloha 1

### HFBR-RXXYYYYZ Series (POF)

### HFBR-EXXYYYYZ Series (POF)

Plastic Optical Fiber Cable and Accessories  
for Versatile Link



## Data Sheet

### Cable Description

The HFBR-R/EXXYYYYZ series of plastic fiber optic cables are constructed of a single step-index fiber sheathed in a black polyethylene jacket. The duplex fiber consists of two simplex fibers joined with a zipcord web.

Standard attenuation and extra low loss POF cables are identical except for attenuation specifications. Polyethylene jackets on all plastic fiber cables comply with UL VW-1 flame retardant specification (UL file # E89328).

Cables are available in unconnected or connected options. Refer to the Ordering Guide for part number information.

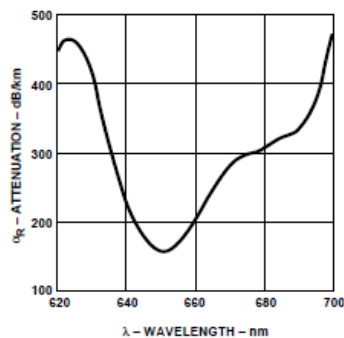


Figure 1. Typical POF attenuation vs. wavelength.

### Features

- Compatible with Avago Versatile Link family of connectors and fiber optic components
- 1 mm diameter Plastic Optical Fiber (POF) in two grades: low cost standard POF with 0.22 dB/m typical attenuation, or high performance extra low loss POF with 0.19 dB/m typical attenuation

### Applications

- Industrial data links for factory automation and plant control
- Intra-system links; board-to-board, rack-to-rack
- Telecommunications switching systems
- Computer-to-peripheral data links, PC bus extension
- Proprietary LANs
- Digitized video
- Medical instruments
- Reduction of lightning and voltage transient susceptibility
- High voltage isolation

## Plastic Optical Fiber Specifications: HFBR-R/EXXYYYZ

### Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Unit	Note
Storage and Operating Temperature	$T_{S,0}$	-55	+85	°C	
Recommended Operating Temperature	$T_0$	-40	+85	°C	
Installation Temperature	$T_I$	-20	+70	°C	1
Short Term Tensile Force	Single Channel	$F_T$	50	N	2
	Dual Channel	$F_T$	100	N	
Short Term Bend Radius	$r$	25		mm	3, 4
Long Term Bend Radius	$r$	35		mm	
Long Term Tensile Load	$F_T$		1	N	
Flexing			1000	Cycles	4

Mechanical/Optical Characteristics,  $T_A = -40$  to  $+85^\circ\text{C}$  unless otherwise specified.

Parameter	Symbol	Min.	Typ. <sup>[5]</sup>	Max.	Unit	Condition
Cable Attenuation	Standard Cable, Type "R"	$\alpha_0$	0.15	0.22	0.27	dB/m Source is HFBR-15XXZ (660 nm LED, 0.5 NA) $\ell = 50$ meters
	Extra Low Loss, Type "E"		0.15	0.19	0.23	
Reference Attenuation	Standard Cable, Type "R"	$\alpha_R$	0.12	0.19	0.24	dB/m Source is 650 nm, 0.5 NA monochromator, $\ell = 50$ meters Note 7, Figure 1
	Extra Low Loss, Type "E"		0.12	0.16	0.19	
Numerical Aperture	NA	0.46	0.47	0.50		>2 meters
Diameter, Core and Cladding	$D_C$	0.94	1.00	1.06	mm	
Diameter, Jacket	$D_J$	2.13	2.20	2.27	mm	Simplex Cable
Propagation Delay Constant	$l/v$		5.0		ns/m	Note 6
Mass per Unit Length/Channel			5.3		g/m	Without Connectors
Cable Leakage Current	$I_L$		12		nA	50 kV, $\ell = 0.3$ meters
Refractive Index	Core	$n$		1.492		
	Cladding			1.417		

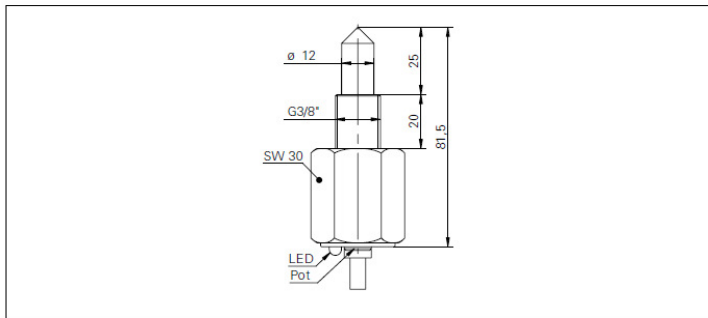
#### Notes:

1. Installation temperature is the range over which the cable can be bent and pulled without damage. Below  $-20^\circ\text{C}$  the cable becomes brittle and should not be subjected to mechanical stress.
2. Short Term Tensile Force is for less than 30 minutes.
3. Short Term Bend Radius is for less than 1 hour nonoperating.
4.  $90^\circ$  bend on 25 mm radius mandrel. Bend radius is the radius of the mandrel around which the cable is bent.
5. Typical data are at  $25^\circ\text{C}$ .
6. Propagation delay constant is the reciprocal of the group velocity for propagation delay of optical power. Group velocity is  $v=c/n$  where  $c$  is the velocity of light in free space ( $3 \times 10^8$  m/s) and  $n$  is the effective core index of refraction.
7. Note that  $\alpha_R$  rises at the rate of about 0.0067 dB/°C, where the thermal rise refers to the LED temperature changes above  $25^\circ\text{C}$ . Please refer to Figure 1 which shows the typical plastic optical fiber attenuation versus wavelength at  $25^\circ\text{C}$ .

**Liquid level and leakage sensors**

**FFAK 17PTD1002/L**

**dimension drawing**



**general data**

type	liquid level sensor
light source	pulsed infrared diode
nominal pressure (probe tip)	10 bar
output indicator	LED yellow
sensitivity adjustment	potentiometer, 15 turn
wave length	880 nm

**electrical data**

voltage supply range +Vs	10 ... 30 VDC
current consumption max.	15 mA
voltage drop Vd	< 2 VDC
output function	normally open (NO)
output circuit	PNP
output current	< 200 mA
short circuit protection	no
reverse polarity protection	yes, Vs to GND

**mechanical data**

width / diameter	30 mm
height / length	81,5 mm
thread	G 3/8"
type	cylindrical
material (sensing device)	polysulphone
housing material	polysulphone
connection types	cable 3 pin, 2 m

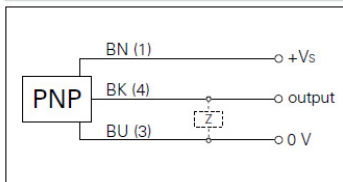
**ambient conditions**

operating temperature	0 ... +65 °C
protection class	IP 67

**photo**



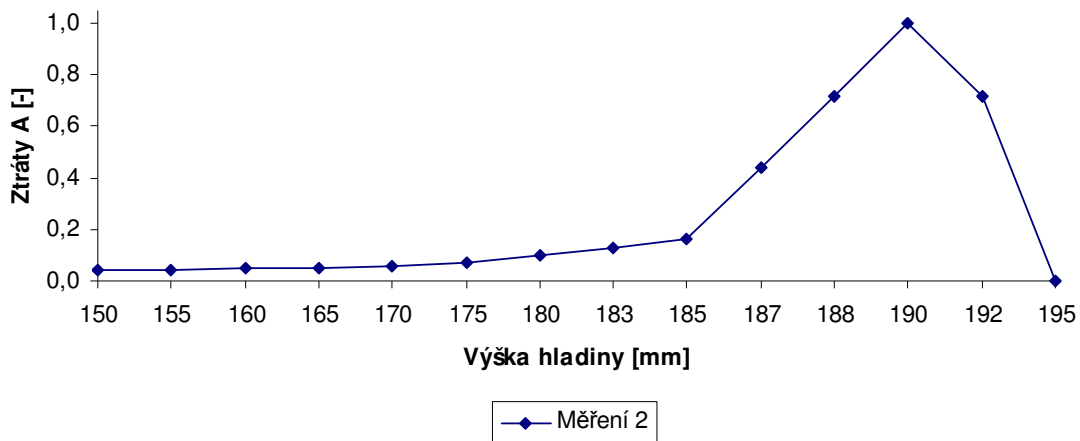
**connection diagram**



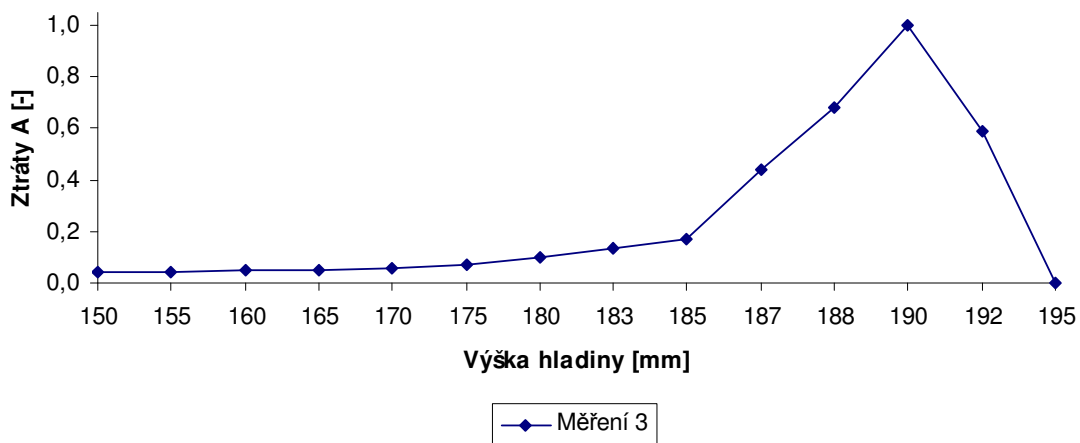
• switched when dipped

### Příloha 3

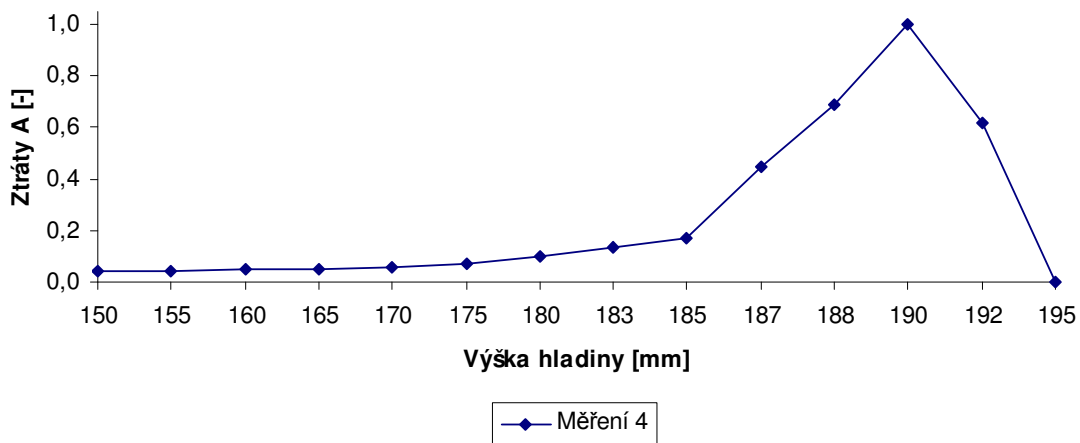
#### Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny



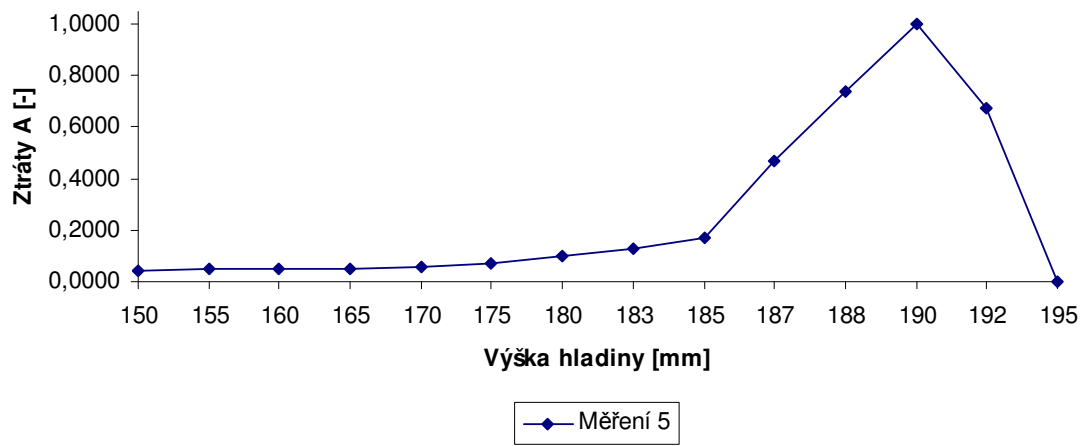
#### Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny



#### Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny

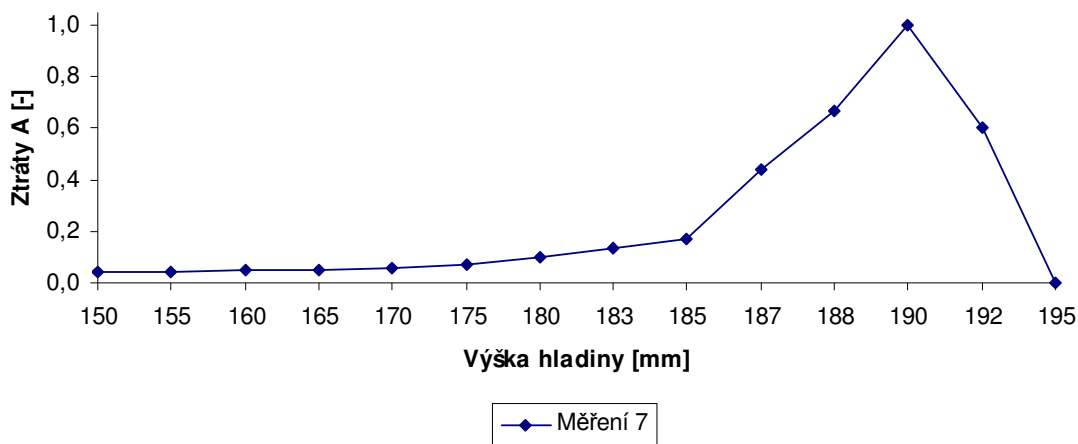


### Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny

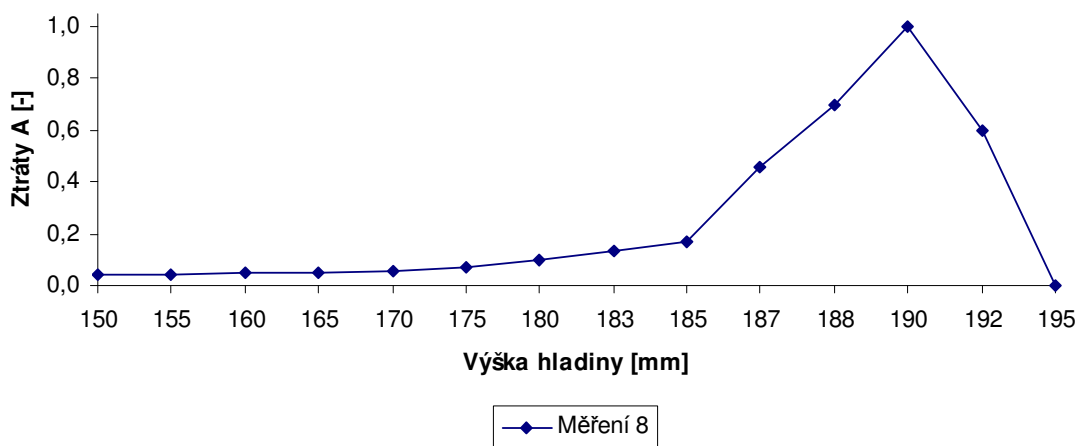


## Příloha 4

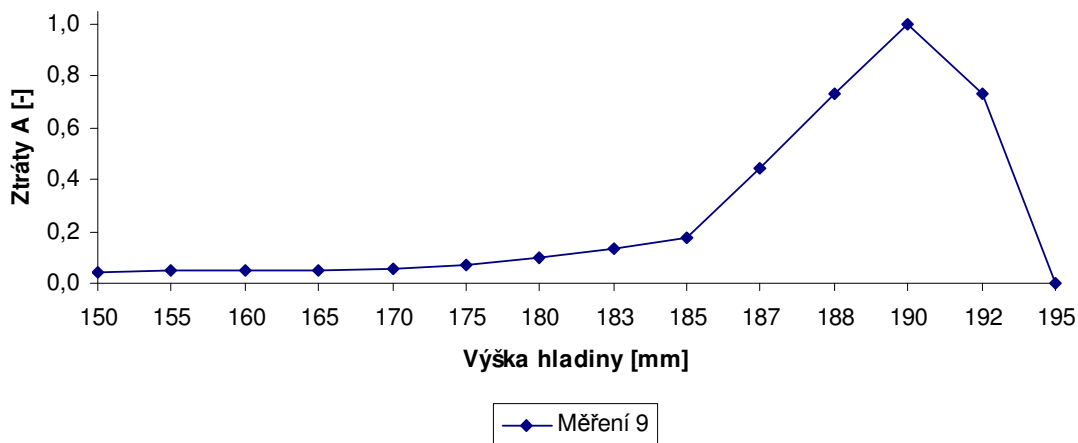
### Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny



### Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny



### Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny



### Závislost ztrát reflexní sondy na výšce hladiny

