

# **České vysoké učení technické v Praze**

## **Fakulta elektrotechnická**

Katedra elektromagnetického pole  
Program: Komunikace, multimédia a elektrotechnika (MP2)  
Obor: Bezdrátové komunikace (2601T017)



## DETEKCE SIGNÁLU V OPTICKÝCH VLÁKNECH ZA PROVOZU

Diplomová práce

Vypracoval: Bc. Martin Valko  
Vedoucí práce: Ing. Jan Šístek, Ph.D.  
Rok: 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Valko** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **394865**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Bezdrátové komunikace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Detekce signálu v optických vlákna za provozu**

Název diplomové práce anglicky:

**Signal Detection in Optical Fibers During Traffic (Live Fiber Detection)**

Pokyny pro vypracování:

Popište jevy, které nastávají ve standardním jednovláknovém optickém vlákně při ohybu. Kvantifikujte útlum vzniklý ohybem. Na základě těchto poznatků navrhnete ukázkový experiment pro vyvážení energie ohybem za účelem detekování, zda vláknem prochází signál (zda jde o tzv. živé vlákno) s příp. hrubým určením výkonu signálu. Proveďte ověření na vzorcích jednovláknových vláken. Porovnejte dosažené výsledky s měřeními pomocí profesionálních přístrojů založených na stejném principu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Wang, Q., Farrell, G. Freir, T.: Theoretical and experimental investigations of macro-bend losses for standard single mode fibers. Optics Express, vol. 13, no. 12, pp. 4476-4484.  
[2] Baden, J. L. et al.: Optical components for live-fiber identifier and coupler. USA, patentový spis US005708499A z 13. 1. 1998.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jan Šístek Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **07.01.2019**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tento projekt vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....  
Bc. Martin Valko

## **Poděkování**

Děkuji Ing. Janu Šístkovi, Ph.D. za vedení při vypracovávání diplomové práce, především pak za konzultace, návrhy a neodmyslitelnou pomoc při zpracování matematické části projektu. Děkuji také firmě PROFibre Networking CZ s.r.o. za zapůjčení profesionálního přístroje k detekci živého vlákna EXFO LFD-250. V neposlední řadě také oponentovi Ing. Pavlu Peterkovi, Ph.D. za přínosné komentáře při řešení této práce.

.....  
Bc. Martin Valko



<i>Název práce:</i>	<b>Detekce signálu v optických vláknech za provozu</b>
<i>Autor:</i>	Bc. Martin Valko
<i>Obor:</i>	Komunikace, multimédia a elektrotechnika
<i>Druh práce:</i>	Diplomová práce (ADIP25)
<i>Vedoucí práce:</i>	Ing. Jan Šístek, Ph.D. Katedra elektromagnetického pole, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze
<i>Konzultant:</i>	---
<i>Abstrakt:</i>	Práce si klade za cíl popsat jevy nastávající v optických vláknech při ohybu a na základě získaných poznatků navrhnout experiment pro nedestruktivní detekci signálu v optických vláknech. Dalším cílem je ověření formou experimentu na vybraných vzorcích vláken a následné porovnání výsledků s měřením na profesionálních přístrojích využívajících stejného principu detekce.
<i>Klíčová slova:</i>	optické vlákno, útlum, makro-ohyb, poloměr ohybu, detekce živého vlákna, Fourierova transformace
<i>Title:</i>	<b>Signal Detection in Optical Fibres During Traffic (Live Fibre Detection)</b>
<i>Author:</i>	Bc. Martin Valko
<i>Department:</i>	Communication, multimedia and electronics
<i>Type of article:</i>	Thesis (ADIP25)
<i>Supervisor:</i>	Ing. Jan Šístek, Ph.D. Department of Electromagnetic Field, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague
<i>Consultant:</i>	---
<i>Abstract:</i>	The thesis aims to describe phenomena occurring in optical fibers during bending. From the lessons learned, to propose an experiment for non-destructive detection of the signal in optical fibers. Verify the experiment's functionality on selected fiber patterns and then compare the results with measurements on professional devices based on the same detection principle.
<i>Key words:</i>	optical fibre, loss, macro-bend, banding radius, live fibre detection, Fourier transformation

# Obsah

Seznam zkratk.....	I
Seznam symbolů.....	II
Seznam obrázků.....	III
Seznam tabulek.....	IV
1. Úvod.....	1
2. Vláknový vlnovod typu SI.....	2
2.1 Šíření paprsku ve vlákně.....	2
3. Útlum vlivem ohybu.....	7
3.1 Transformace zakřiveného vlákna na přímé.....	8
3.2 Řešení vlnové rovnice.....	9
3.3 Podmínky na rozhraní.....	10
3.4 Řešení pomocí Fourierových řad.....	11
3.5 Řešení pomocí Fourierovy transformace.....	12
3.6 Typické závislosti útlumu ohybem.....	14
4. Profesionální přístroje pro detekci živého vlákna.....	16
4.1 Obecné vlastnosti přístrojů.....	16
5. Experimentální část.....	18
5.1 Numerické výpočty útlumu v Matlabu.....	18
5.2 Experimentální ověření výpočtů.....	19
5.3 Experimentální ověření útlumu ohybem.....	21
5.4 Hlubší rozbor chování vlákna pomocí simulací.....	23
5.5 Vyzařování z ohnutého vlákna.....	25
5.6 Způsob detekce vyzářeného výkonu.....	27
5.7 Mechanické řešení a parametry navrženého detektoru.....	28
5.8 Výsledky detekce profesionálními přístroji.....	30
5.9 Výsledky detekce navrženou aparaturou.....	32
5.10 Zhodnocení navrženého způsobu detekce živého vlákna.....	33
6. Závěr.....	35
7 Použitá literatura.....	36
Příloha 1: Vlastnosti Airyho funkcí.....	37
Příloha 2: Seznam použitých přístrojů.....	39
Příloha 3: Katalogový list vlákna SMF-28 od firmy Cornig.....	41
Příloha 4: Hlavní program v Matlabu.....	43
Příloha 5: Jádro výpočtu, řešení integrálu (23).....	50
Příloha 6: Řešení disperzní rovnice.....	53
Příloha 7: Rombergova integrační metoda.....	55
Příloha 8: Zpracování směrové charakteristiky vyzařování závitu.....	56
Příloha 9: Další simulace vlákna SMF-28 s ochranou 250 $\mu\text{m}$ .....	57
Příloha 10: Fotodokumentace.....	60
Příloha 11: Seznam použitého Software.....	64

## Seznam zkratk

	<i>Význam anglicky</i>	<i>Význam česky</i>
GNU GPL	GNU General public license	Všeobecná veřejná licence GNU
LFD	Live fiber detector	Detektor živého vlákna
MMF	Multi mode fiber	Vícevidové vlákno
NA	Numerical aperture	Numerická apertura
SMF	Single mode fiber	Jednovidové vlákno
SI	Step index	Vlákno se skokovou změnou indexu lomu

## Seznam symbolů

	<i>Význam</i>
$Ai(x)$	Airyho funkce
$a$	poloměr jádra vlákna
$Bi(x)$	Airyho funkce
$b$	normovaná podélná konstanta šíření, také poloměr pláště vlákna
$d_0$	vzdálená oblast
$E_z$	složka elektrické intenzity ve směru šíření $z$
$H_z$	složka magnetické intenzity ve směru šíření $z$
$J_m(x)$	Besselova funkce prvního druhu $m$ -tého řádu
$K_m(x)$	Besselova funkce druhého druhu $m$ -tého řádu
$\mathbf{k}$	vlnový vektor
$k_0$	vlnové číslo (0 pro vakuum/vzduch)
$k_r$	radiální složka příčné konstanty šíření
$k_\varphi$	azimutální složka příčné konstanty šíření
$k_p$	příčná konstanta šíření
$NA$	numerická apertura vlákna
$n$	index lomu
$n_{ef}$	efektivní index lomu
$u$	normovaná příčná konstanta šíření v jádře
$v$	normovaná příčná konstanta šíření v plášti
$V$	normovaný kmitočet
$r$	radiální souřadnice
$z$	podélná souřadnice
$\alpha$	měrný útlum
$\beta$	podélná konstanta šíření
$\Delta$	poměrný rozdíl indexů lomu
$\varphi$	fáze
$\zeta$	transformovaná souřadnice $y$ ve Fourierově transformaci
$\psi$	zvolená složka pole $E_z$ či $H_z$
$\nu$	úhel akceptance

## Seznam obrázků

Obr. 1. Šíření vlny ve vlákne typu SI	2
Obr. 2. Rozložení konstanty šíření $k$ ve válcové soustavě	3
Obr. 3. Průběh Besselovy funkce prvního druhu	4
Obr. 4. Průběh Besselovy funkce druhého druhu	4
Obr. 5. Průřez optickým vláknem s rozložením vlny v plášti	4
Obr. 6. Disperzní charakteristiky vlákna se slabým vedením vlny	6
Obr. 7. Průběh ztrát v optickém vlákně při ohybu	7
Obr. 8. Reálná ukázka vyzařování	8
Obr. 9. Vláknem v cylindrické a kartézské soustavě	9
Obr. 10. Příčný řez vláknem s konečným pláštěm a nekonečným obalem	11
Obr. 11. Vypočítané ztráty ohybem v závislosti na vlnové délce $\lambda$ ;	14
Obr. 12. Vypočítané ztráty ohybem v závislosti na poloměru ohybu $R$	14
Obr. 13. Vypočítané ztráty ohybem v závislosti na numerické apertuře $NA$	15
Obr. 14. Princip funkce zmiňovaných přístrojů	16
Obr. 15. Blokové schéma a uspořádání sestavy pro měření numerické apertury $NA$	19
Obr. 16. Určení numerické apertury námi použitého vlákna standardu SMF-28	20
Obr. 17. Schéma zapojení experimentu k ověření numerických výpočtů útlumu	21
Obr. 18. Ztráty ohybem v závislosti na vlnové délce, kde parametrem je poloměr ohybu $R=16$ mm	22
Obr. 19. Ztráty ohybem v závislosti na vlnové délce, kde parametrem je poloměr ohybu $R=20$ mm	22
Obr. 20. Závislost útlumu na poloměru ohybu $R < 8$ mm	23
Obr. 21. Závislost vyzářeného výkonu na poloměru ohybu	24
Obr. 22. Měření směrové charakteristiky závitů optického vlákna	25
Obr. 23. Směrová charakteristika vlákna SMF-28	26
Obr. 24. Integrační koule	27
Obr. 25. V-drážka pro uchycení optického vlákna o definovaném poloměru $R=7,7$ mm	28
Obr. 26. Zvolená integrační koule II	29
Obr. 27. Profesionální přístroj <i>LFD-250</i>	30
Obr. 28. Uspořádání aparatury pro měření útlumu ohybem za pomoci integrační koule	31

## Seznam tabulek

Tab. 1. Srovnání typických vlastností přístrojů	17
Tab. 2. Parametry simulovaného vlákna, index lomu $n_2$ dopočítán ze změřené $NA$	21
Tab. 3. Přehled parametrů integračních koulí;	28
Tab. 4. Změřené hodnoty pro vyhodnocení kvality koulí	29
Tab. 5. Výkon indikovaný přístrojem Exfo LFD-250 jako funkce výkonové úrovně vlnové délky	30
Tab. 6. Naměřené a vypočítané hodnoty z měření integrační koulí	31

# 1. Úvod

Standardní jednovidová vlákna jsou klíčovým prvkem komunikací. Mezi jejich přednosti patří nízký útlum. Jde o vlákna s tzv. slabým vedením vlny. Podmínku vedení lze snadno porušit např. ohybem.

Tato práce popisuje na základě dostupné literatury příčinu vzniku útlumu při ohybu, uvádí způsob výpočtu a experimentálně ověřuje teoretické výpočty. Na základě poznatků je navržen experiment detekce signálu v optickém vlákně. Jde o nedestruktivní metodu, tedy měření za provozu. Vyvazování je experimentálně vyzkoušeno na různých provedeních kabelů s jednovidovým vláknem. Při experimentálním ověření vlny vyvázané ohybem z živého vlákna je použito netradiční metody detekce signálu integrační koulí. Toto ověření je dále porovnáno s výsledky měření profesionálním přístrojem.

## 2. Vlákno vládovú typu SI

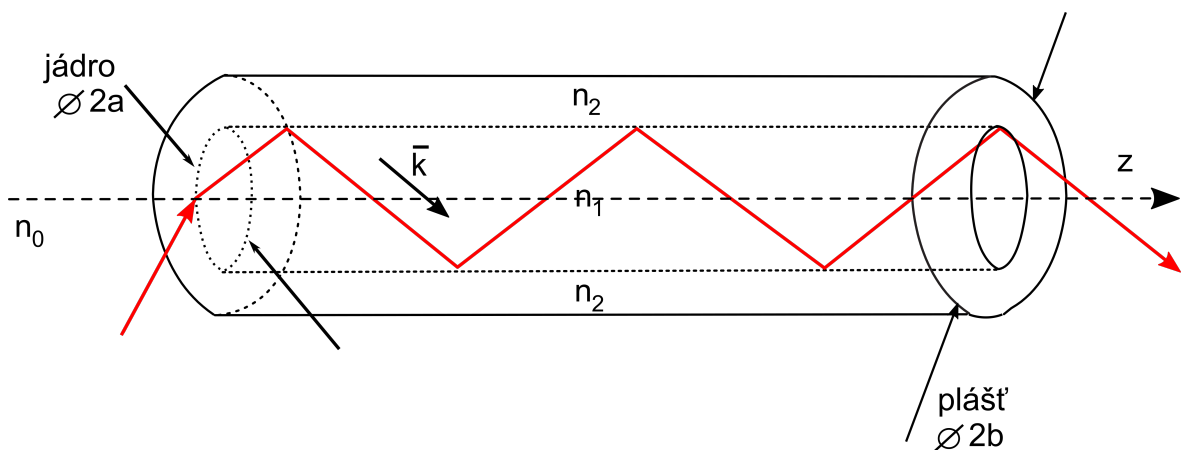
### 2.1 Šíření paprsku ve vlákně

Protože se práce zabývá popisem útlumu vlákná s ohybem, je třeba si nejprve připomenout základní poznatky ze šíření vlny v jednovldovém vláknú.

Ve vlákních se skokovým indexem lomu (SI z ang. Step Index) dochází k totálnímu odrazu na rozhraní dvou prostředí, definovaných indexy lomu  $n_1$  (jádru),  $n_2$  (plášť). K odrazu dochází při přechodu z prostředí opticky hustšího (jádru) do prostředí opticky řidšího (plášť). Trajektorie šíření je na obr. 1. Vlákno SI může být jednovldové (tzv. SMF) a vícevldové (MMF). Tato práce se zabývala pouze vláknem typu SMF.

Analyzujeme-li standardní telekomunikační vláknú typu SMF, máme na mysli vláknú s tzv. slabým vedením vlny. To znamená, že normovaný rozdíl indexů lomu  $\Delta$  je v řádu tisícín. Určíme jej podle vztahu:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1)$$

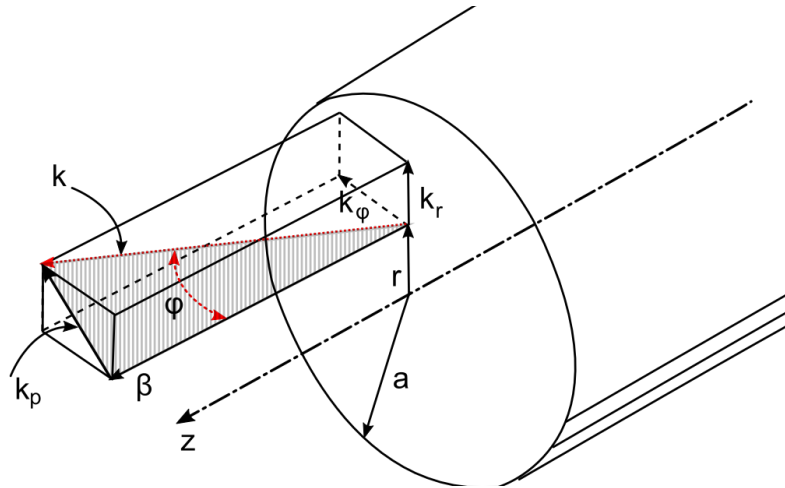


Obr. 1. Šíření vlny ve vlákně typu SI  
 $2a$  průměr jádra ( $\sim 8 \mu\text{m}$ ),  $2b$  průměr plášť ( $\sim 125 \mu\text{m}$ ),  $n_0$  index lomu prostředí ( $\sim 1$  vakuum/vzduch),  $z$  směr šíření

Dominantní vid se šíří ve směru konstanty šíření  $k$ , která se dá dále rozložit.

Standardní SMF je pro svoji geometrii definované ve válcových souřadnicích. Obecný paprsek (meridiánový) má tak konstantu šíření rozloženou do všech tří směrů válcových souřadnic. Označme je  $k_r$ ,  $k_\phi$ ,  $\beta$ . Situaci znázorňuje obr. 2.





Obr. 2. Rozložení konstanty šíření  $k$  ve válcové soustavě

V souladu s výkladem je pro obecnost zavedena dvojice příčných konstant  $k_{p1}$  v prostředí 1 a  $k_{p2}$  v prostředí 2. Prostředí číslo 1 s indexem lomu  $n_1$  odpovídá jádru. Prostředí číslo 2 s indexem  $n_2$  odpovídá plášti. Jednotlivé složky jsou svázané rovnicí:

$$k_{p_{1,2}}^2 + \beta^2 = n_{1,2}^2 k_0^2 = k_{1,2}^2 \quad (2)$$

kde  $k_{1,2}$  jsou odpovídající vlnová čísla,  $\beta$  je podélná složka konstanty šíření (stejná v obou prostředích) a  $k_{p_{1,2}}$  je příčná složka konstanty šíření rozložitelná do směru radiálního a azimutálního:

$$k_{p_{1,2}}^2 = k_{r_{1,2}}^2 + k_{\varphi_{1,2}}^2 \quad (3)$$

Obvykle hledáme podélnou konstantu ve směru šíření  $\beta = k_{lz}$ , respektive odpovídající veličinu efektivní index lomu  $n_{ef}$ . Tento index vyjadřuje, jaký by musel být index lomu homogenního prostředí, aby se jím vlna šířila stejnou fázovou rychlostí jako ve vlnovodu [2]. Definujeme jej jako:

$$n_{ef} = \frac{\beta}{k_0} \quad (4)$$

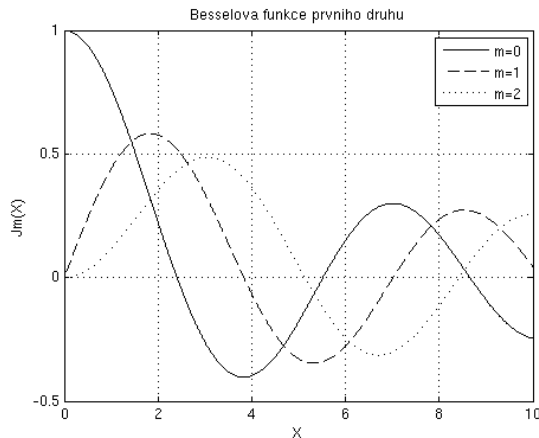
Fázory pole uvažujeme ve tvaru [2]:

$$E = E_p(r, \varphi) e^{-j\beta z} \quad (5)$$

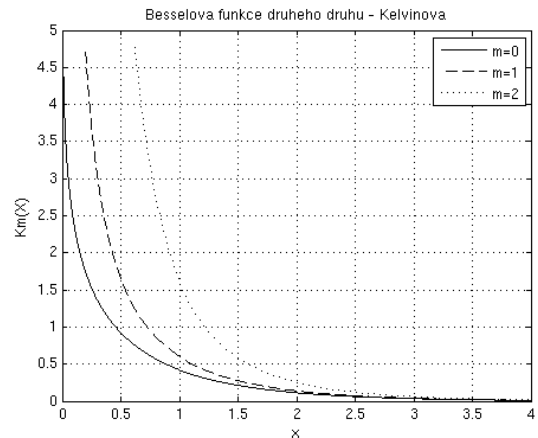
$$H = H_p(r, \varphi) e^{-j\beta z} \quad (6)$$

kde  $E_p, H_p$  jsou funkcemi pouze příčných souřadnic

Rovnice (5), (6) jsou řešením vlnové rovnice. Toto řešení má periodickou podélnou složku a určité příčné rozložení. V příčné rovině vlivem válcového charakteru struktury vyjde řešení jako součin jedné z Besselových (v jádru  $J_m$ ), eventuálně Kelvinových (v plášti  $K_m$ ) funkcí (ve směru radiálním) a periodické funkce ve směru azimutálním. Průběhy obou Besselových funkcí jsou na obrázcích 3 a 4\*:

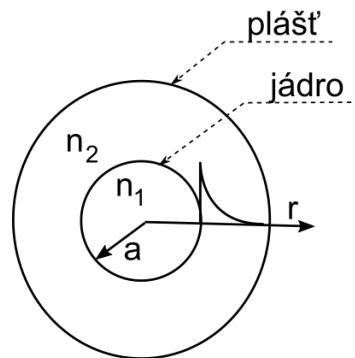


Obr. 3. Průběh Besselovy funkce prvního druhu



Obr. 4. Průběh Kelvinovy funkce druhého druhu

Dominantní vliv na šíření vlny ve struktuře má příčná složka konstanty šíření. V jádře je  $k_1 = k_0 n_1$ , v plášti  $k_2 = k_0 n_2$ . Ve vláknech pak platí, že  $k_2 < \beta < k_1$  a také  $n_2 < n_c < n_1$ . Protože se celková konstanta šíření rozkládá dle rovnice (2) a protože platí podmínky výše, vyjde  $k_{1p}$  reálné v jádře a  $k_{2p}$  imaginární v plášti. Imaginární  $k_{2p}$  představuje evanescentní vlnu.



Obr. 5. Průřez optickým vláknem s rozložením vlny v plášti

Předpokládáme nejjednodušší model, kdy jádro obklopuje nekonečně veliký plášť

\* písmeno  $m$  v grafech označuje řád Besselovy funkce.

(tj.  $r \rightarrow \infty$ ), viz. obr. 5. Ukazuje se, že je výhodné příčné konstanty šíření normovat, a to vzhledem k poloměru jádra  $a$ . Zavádíme tak nové normované příčné konstanty.

$$u = a k_{k_1 p} = a \sqrt{k_1^2 - \beta^2} \quad (7)$$

$$v = j a k_{k_2 p} = a \sqrt{\beta^2 - k_2^2} \quad (8)$$

Normované konstanty šíření  $u$  a  $v$  jsou také svázány vztahem:

$$V^2 = u^2 + v^2 \quad (9)$$

kde  $V$  je normovaný kmitočet.

Z praktického hlediska normovaný kmitočet zavádíme také proto, aby bylo možné srovnávání různých vláken. Vztah totiž zahrnuje jak jednotlivé indexy lomu vláken (respektive numerickou aperturu vláken  $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ ), poloměr jádra  $a$ , tak i vlnovou délku vlny.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = k_0 a NA \quad (10)$$

Normovaného kmitočtu  $V$  a normovaných příčných konstant šíření využijeme dále k definování normované podélné konstanty šíření, kterou použijeme při praktickém řešení disperzní rovnice:

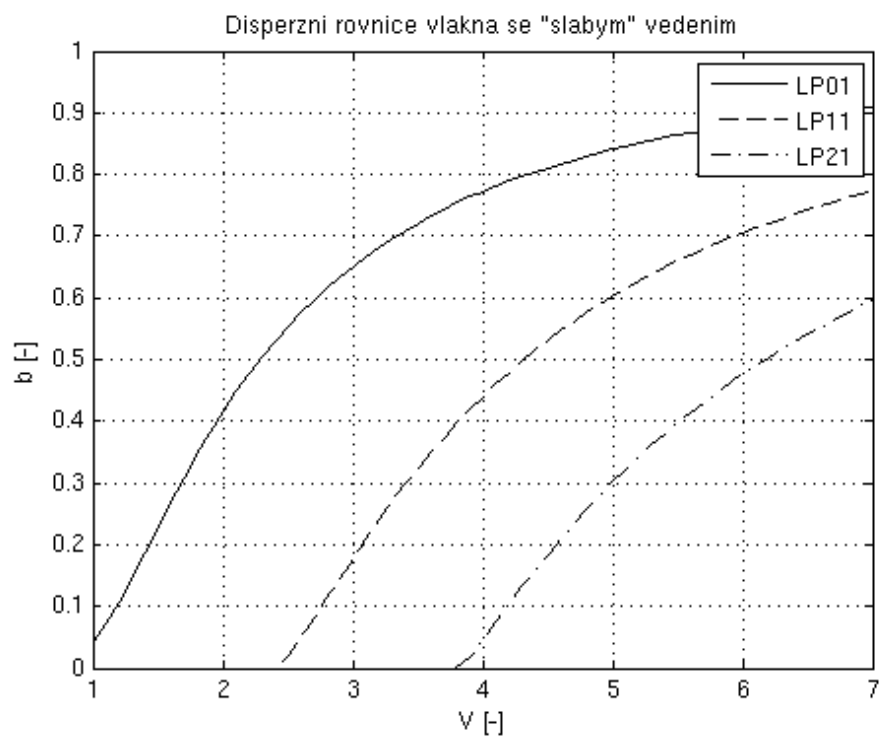
$$b = \left(\frac{v}{V}\right)^2 = 1 - \left(\frac{u}{V}\right)^2 \quad (11)$$

Pro stanovení vlastností dielektrických vlnovodů, především pak z hlediska vlnové závislosti, potřebujeme znát tzv. disperzní charakteristiky. Tyto charakteristiky vyjadřují závislost mezi normovanou podélnou složkou konstanty šíření a normovaným kmitočtem (případně vlnovou délkou). Charakteristiky jsou definovány tzv. disperzní rovnicí. Pro dominantní vid  $HE_{11}$ , respektive  $LP_{01}$  (lineárně polarizovaný vid ve vlákně se slabým vedením) dostaneme rovnicí: [3]

$$\frac{J_{v-1}(u)}{u J_v(u)} - \frac{K_{v-1}(v)}{v K_v(v)} = 0 \quad (12)$$

kde  $K, J$  jsou známé Besselovy funkce;  $u, v$  jsou normované příčné konstanty;  $v$  označuje číslo vidu.

Disperzní křivky dominantního a několika dalších vidů vlákna se slabým vedením ilustruje obr. 6.



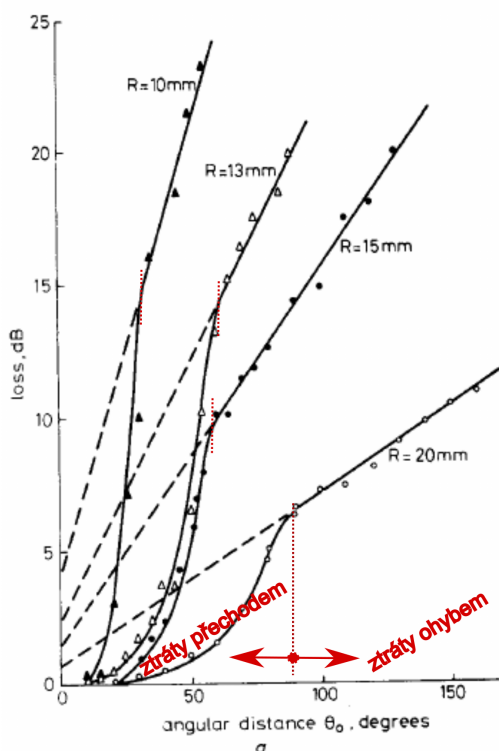
Obr. 6. Disperzní charakteristiky vlákna se slabým vedením vlny

### 3. Útlum vlivem ohybu

Obecně rozlišujeme dva typy ohybů, mikroohyby a makroohyby. Práce si klade za cíl objasnit pouze vliv makroohybů (z ang. macrobend). V tomto případě se poloměr ohybu  $R$  pohybuje řádově v jednotkách milimetrů. Vlivem těchto ohybů může docházet k vyzařování energie z vlákna a tím nárůstu útlumu. To lze vysvětlit dvěma způsoby. Z hlediska teorie pole se v místech dále od středu křivosti vlna šíří rychleji než blíže středu. Až by měla evanescentní vlna překročit rychlost světla, energie se vyzaří. Z hlediska geometrie potom ohybem dochází ke zmenšení úhlu dopadu na rozhraní. To může narušit totální odraz. [2]

Jak ukazuje studie [4], samotný útlum má dvě příčiny. První příčinou je diskontinuita v místě přechodu rovného vlákna do ohnutého. Jde o tzv. ztráty přechodem (z ang. transition loss). Druhou příčinou jsou ztráty vzniklé samotným ohybem (z ang. pure bend loss). Průběh ztrát zobrazuje obr. 7.

Ztráty přechodem lze do jisté míry formovat plynulostí přechodu. Čím ostřejší přechod bude, tím výraznějších ztrát dosáhneme. Tyto ztráty také významně ovlivňují charakter vyzařování. Svazky vystupující z pláště jsou v pravidelných úhlových rozestupech a tečnají k vnější straně vlákna, viz. obr. 8. Se snižující se mírou ztrát přechodem tyto úhlové rozestupy zcela mizí. Homogenní vyzařování odpovídá útlumu pure bend loss. Křivka tohoto druhu ztrát rovnoměrně roste s úhlovou (či lineární) délkou navinutého vlákna, čímž se liší od ztrát přechodem, které narostou prudce.



Obr. 7. Průběh ztrát v optickém vlákně při ohybu (převzato z [5])  
normovaný kmitočet  $V=2,4$ ; poloměr jádra  $a=3,9\ \mu\text{m}$ , numerická apertura  $NA=0,06$



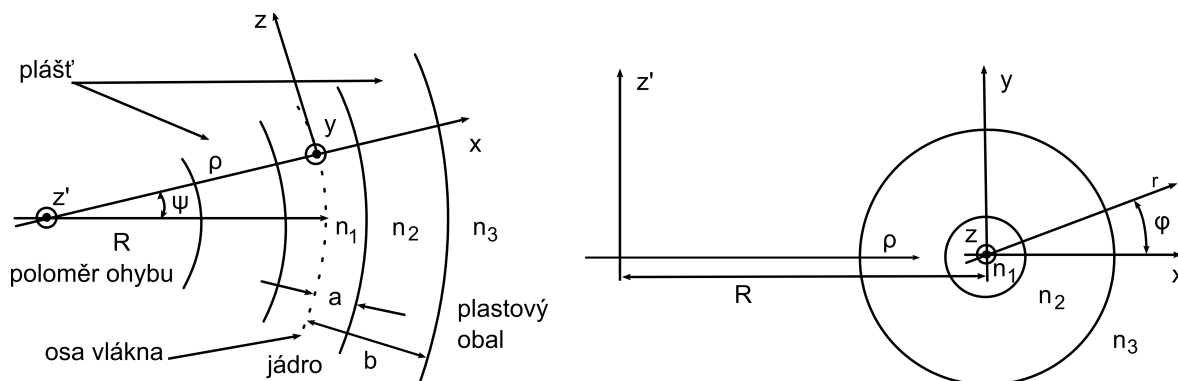
Obr. 8. Reálná ukázka vyzařování (převzato z [6]);  
vlákno stočeno v rovině kolmé na směr pozorování, jsou zde zřetelně patrné vystupující svazky

V experimentu na obr. 8. bylo použito jednojádřové vlákno s průměrem jádra  $9,8 \mu\text{m}$ . Buzené bylo *He-Ne* laserem o vlnové délce  $0,633 \mu\text{m}$  (normovaný kmitočet  $V=2,78$ ). Vláknem bylo položeno na skleněné destičce a ponořeno do parafinu s indexem lomu o něco vyšším než je index lomu pláště.

Vyzařování vlny z vlákna vlivem ohybu lze pozorovat i ve viditelné oblasti. Jev je často označován jako tzv. "krvácení" vlákna.

### **3.1 Transformace zakřiveného vlákna na přímé**

Tato a následující kapitoly popisují na základě dostupné literatury výpočet útlumu vlákna vlivem ohybu. Problém se podstatně usnadní, pokud zavedeme geometrickou transformaci, kterou se zakřivené vlákno změní na přímé. V souvislosti s tím je třeba upravit profil indexu lomu zavedením tzv. efektivního indexu lomu. Současně lze provést změnu souřadné soustavy z cylindrické (v níž se normálně rotačně symetrické struktury analyzují) na kartézskou, což také zjednoduší řešení. Geometrickou transformaci i změnu souřadné soustavy ilustruje obr. 9.



Obr. 9. Vlákn v cylindrické a kartézské soustavě (převzato z [3])

koeficienty  $(\rho, \psi, z)$  v cylindrické soustavě,  $(x, y, z)$  v kartézské soustavě;  $n_1$  index lomu v jádře,  $n_2$  index lomu v plášti,  $n_3$  index lomu v obalu,  $a$  poloměr jádra,  $b$  poloměr pláště,  $z$  rovina ve směru šíření,  $R$  poloměr ohybu.

Jak bylo avizováno výše, aplikací geometrické transformace dochází ke změně profilu indexu lomu. Modifikovaný index lomu  $n_{ef}$  získáme lineární aproximací indexu lomu jako [8]

$$n_{ef}(x, y) = n_q^2(x, y) \left(1 + \frac{2x}{R}\right) \quad (13)$$

kde  $n_q$  je index lomu oblasti  $q$  ( $q \in \{1, 2, 3\}$ ) v kartézské soustavě  $(x, y, z)$ ,  $R$  je poloměr ohybu.

Vlnová rovnice pro slabé vedení vlny má nyní tvar:

$$\nabla_t^2 \psi(x, y) + [k_0^2 n_{ef}^2(x, y) - \beta^2] \psi(x, y) = 0 \quad (14)$$

kde  $\nabla_t^2$  je operátor aplikovaný jen na příčné (transverzální) rozložení pole a  $\psi$  je zvolená složka pole ( $E_z$  či  $H_z$ ).

V člancích [7],[1],[9],[10] je vlnové číslo  $k_0$  přetyповáno na  $k$ .

### 3.2 Řešení vlnové rovnice

Operátor  $\nabla_t^2$  (nabla) obsahuje druhé derivace podle  $x$  a  $y$ . Články [6], [1], [9], [10] řeší nejprve derivaci podle  $y$  a následně podle  $x$ . Jedno z prvních řešení využívalo podle  $y$  Fourierovy řady, kdy je druhá derivace triviální. Novější články užívají Fourierovy transformace podle  $y$ , kde se  $y$  stává transformovaná souřadnice  $\zeta$ .

Řešení podle  $x$  vede na tzv. Airyho funkce. Všechny články (viz. výše) uvádí obecné řešení pole ve vrstvách 1, 2, 3 (jádro, plášť, obal) a následně zavedou podmínky na rozhraní. Také navazují evanescentní vlnu v plášti na vlnu v jádře přímého vlákna. Dále se už přístup liší

podle toho, zda se používají právě Fourierovy řady nebo Fourierova transformace. Cílem je zjistit rozložení pole ve všech vrstvách vlákna. Ta složka, která roste s poloměrem (má jako bázi Airyho funkci  $B_i$ ), evidentně vzniká odrazem od vnějších vrstev. Tato vlna potom v jádru interferuje s původní vlnou. Airyho funkce jsou rozebrány v Příloze 1. Dalším krokem je určení útlumu, který přímo souvisí s nárůstem imaginární složky konstanty šíření  $\beta$ . V této souvislosti uplatňujeme tzv. poruchovou teorii (ang. perturbation theory).

V následujícím výkladu uvedeme nejprve podmínky zaváděné ve všech citovaných článcích (podmínky pro rozložení pole) a následně bude popsáno řešení vlnové rovnice (14) s použitím Fourierových řad a v další kapitole pak s použitím Fourierovy transformace.

### 3.3 Podmínky na rozhraní

Okrajové podmínky řešíme pro dva případy. Prvním případem je přechod mezi dvěma vrstvami (tj. známé rozložení budící vlny prostupující k vnějším vrstvám), druhým případem je situace na povrchu nejvyšší vrstvy (tj. vyzařovací podmínka).

Na rozhraních 1-2 a 2-3 tak musí platit:

$$\psi_1(a) = \psi_2(a) \quad (15)$$

$$\frac{\partial \psi_1(a)}{\partial r} = \frac{\partial \psi_2(a)}{\partial r} \quad (16)$$

První z podmínek zajišťuje zachování spojitosti na rozhraní. Druhá z podmínek potom zajišťuje, aby byla funkce tzv. hladká. Tento pojem v praxi znamená, že požadujeme nejen spojitou funkci, ale spojitou také její derivaci. To je tehdy, mění-li se sklon funkce spojitě. Přesný tvar podmínek na rozhraní uvádí rovnice (5) článku [7].

Na svrchní vrstvě (tj.  $q=3$ , plastový obal) je uplatněna vyzařovací podmínka:

$$H_3(\xi) = -i D_3(\xi) \quad (17)$$

Navíc článek [1] na rozdíl od ostatních článků podmínky na rozhraní (tj. rovnice 15, 16, 17) rozšiřuje pro libovolný počet oblastí  $q$  (tj.  $q > 3$ ). Nicméně výsledkem této studie je, že další přidané oblasti vlákna mají zcela zanedbatelný dopad na výsledný útlum.



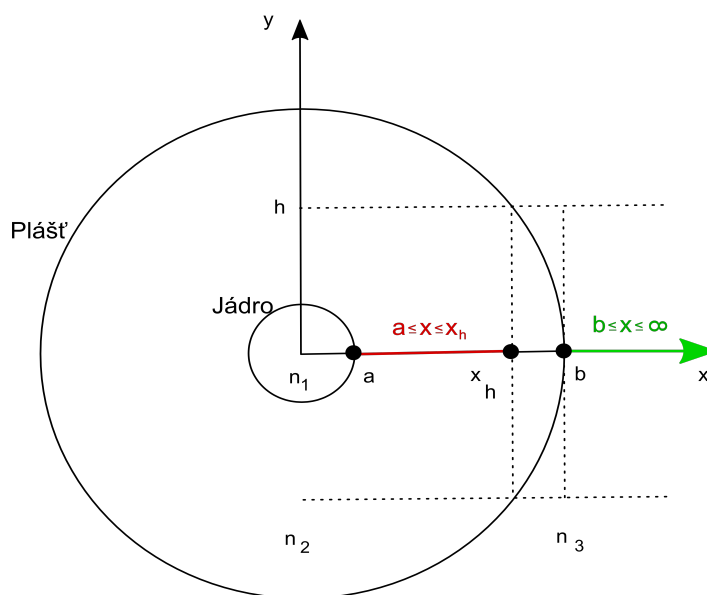
### 3.4 Řešení pomocí Fourierových řad

Výklad je v souladu s článkem [9] a předpokladu vlákna se slabým vedením vlny. Úkolem je nalézt rozložení pole  $\psi$ , které je dáno vlnovou rovnicí (14).

Pole v plášti je úzce omezené na oblast okolo roviny smyčky, díky tomu můžeme řešení omezit na část, pro kterou platí  $|y| < h$ , viz. obr. 10. Pole tak můžeme rozvinout o Fourierovu řadu (ve směru  $y$ ):

$$\psi(x, y) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{p=1}^N \{ C_p Bi[X_{2,p}(x)] + R_p Ai[X_{2,p}(x)] \} \cos \beta_p y, \quad \text{v jádře} \\ \text{kde } a \leq x \leq x_h \\ \sum_{p=1}^N \{ D_p Bi[X_{3,p}(x)] - i Ai[X_{3,p}(x)] \} \cos \beta_p y, \quad \text{v plášti} \\ \text{kde } b \leq x \leq \infty \end{array} \right. \quad (18)$$

kde  $Ai, Bi$  jsou tzv. Airyho funkce,  $C_p, R_p, D_p$  jsou neznámé funkce, které je zapotřebí určit,  $X_{i,p}(x)$  je funkcí  $x$ , kosinové členy jsou báze Fourierovy řady.



Obr. 10. Příčný řez vláknem s konečným pláštěm a nekonečným obalem [9]

V rovnicích (18) jsou neznámé koeficienty  $C_p, R_p, D_p$ . K jejich nalezení využijeme již zmíněné podmínky na rozhraní (tj. rovnice 15, 16) a známé okrajové podmínky (rovnice 17) takto:

1. Pole vystupující z jádra má rozložení známé z přímého vlákna. Toto rozložení je

určeno koeficientem  $C_p$  spjatým s funkcí  $Bi$  (řešení evanescentní vlny) a koeficientem  $R_p$  spjatým s funkcí  $Ai$  (odraženou vlnou od rozhraní plášť-obal).

2. Na rozhraní vrstev platí podmínky na rozhraní. Vedle shody hodnot musíme dosáhnout i shody 1. derivace podle radiály.
3. Na vnější vrstvě musí být splněna vyzařovací podmínka.

Jedná se o nástin myšlenky řešení, details lze potom nalézt přímo v článku [9]. Výsledný vztah pro útlum je uveden tamtéž.

### 3.5 Řešení pomocí Fourierovy transformace

Tento postup byl představen v článku [7] a člancích souvisejících. Opět vycházíme z vlnové rovnice (14). Ta je nyní transformována pomocí Fourierovy transformace ve směru  $y$ :

$$\frac{d^2 \tilde{\psi}_q(x, \xi)}{dx^2} + [k_0^2 n_{ef,q}^2 - \beta_0^2 - \xi^2] \tilde{\psi}_q(x, \xi) = 0 \quad (19)$$

kde číslo  $q$  označuje oblast (2 – plášť, 3 – obal),  $\tilde{\psi}_q(x, \xi)$  je Fourierův obraz  $\psi(x, y)$ ,  $n_{ef}$  je efektivní index lomu,  $k_0$  je vlnové číslo,  $\beta_0$  podélná konstanta šíření přímého vlákna,  $\xi$  je transformovaná souřadnice  $y$  (člen  $[-\xi^2]$  vznikl druhou derivací členu  $[y^2] = -\xi^2$ )

Řešení rovnice (19) v kartézském prostoru  $(x, y)$  dostaneme z inverzního Fourierova integrálu:

$$\psi_q(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \{ D_q(\xi) Bi[X_q(y, \xi)] + H_q(\xi) Ai[X_q(y, \xi)] \} \frac{1}{2\pi} e^{-i\xi y} d\xi \quad (20)$$

kde

$$X_q(x, \xi) = \left( \frac{R}{2k_0^2 n_q^2} \right)^{\frac{2}{3}} \left[ \beta^2 + \xi^2 - k_0^2 n_q^2 \left( 1 + \frac{2x}{R} \right) \right] \quad (21)$$

V rovnici (20) jsou  $D_q, H_q$  obecně neznámé funkce. Cílem je tyto funkce určit z okrajových podmínek. Z nich pak určíme měrný útlum.  $Bi, Ai$  jsou Airyho funkce ( $Bi(x)$  klesá s poloměrem, proto představuje evanescentní vlnu,  $Ai(x)$  s poloměrem roste, proto jde o vlnu vzniklou odrazem od vnějších vrstev), poslední člen představuje již zmíněnou inverzní transformaci.

Jak bylo řešeno výše, vlivem ztrát začne být konstanta šíření komplexní. Ztráty jsou tedy představovány imaginární částí. Ta závisí na poli odraženém od vnějšího rozhraní vrstev.

K určení útlumu se opět využívá poruchová teorie. Bližší informace lze nalézt v člancích [10] a [7].

Koeficient útlumu stanovíme jako:

$$2\alpha = -2\text{Im}(\partial\beta) \quad (22)$$

kde  $\partial\beta$  je změna konstanty šíření vyvolaná ohybem.

Vyřešením podmínek na rozhraní a vyzařovací podmínky dostaneme výsledný integrální vztah pro stanovení koeficientu útlumu  $2\alpha$ : [7]

$$2\alpha = \frac{2\kappa^2}{\beta V^2 K_1^2(a\gamma)} \int_0^\infty \frac{e^{-a\sqrt{\gamma^2+\xi^2}}}{\sqrt{\gamma^2+\xi^2}} \frac{\text{Ai}[X_2(0,\xi)]}{\text{Bi}[X_2(a,\xi)]} \frac{\sqrt{\chi_2\chi_3}}{\chi_2 \cos^2 \theta(\xi) + \chi_3 \sin^2 \theta(\xi)} d\xi \quad (23)$$

kde

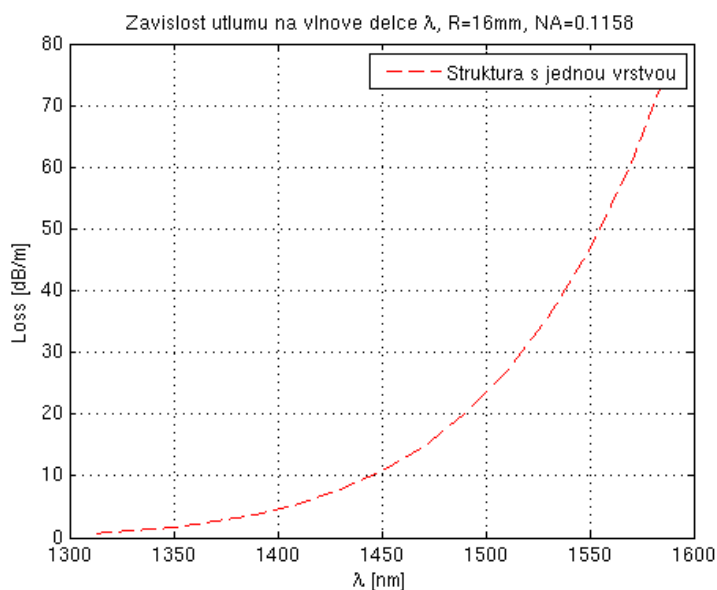
$$\chi_q = \left(\frac{2k_0^2 n_q^2}{R}\right)^{\frac{2}{3}} [-X_q(b,\xi)] \quad (24)$$

$$\theta(\xi) = \frac{2}{3} [-X_2(b,\xi)]^{\frac{3}{2}} + \frac{\pi}{4} \quad (25)$$

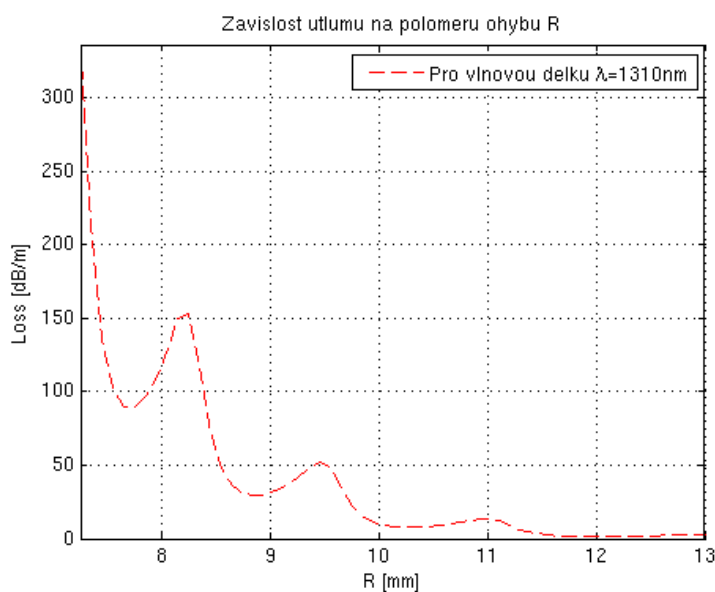
Výsledná hodnota útlumu je v jednotkách  $[Np/m]$  (neper na metr). Pro přepočítání na  $[dB/m]$  musíme hodnotu násobit koeficientem  $[20 \cdot \log(e)] = 8,68$ .

### 3.6 Typické závislosti útlumu ohybem

Typické vlastnosti útlumu vlivem ohybu (máme na mysli homogenní úsek, tj. pure band loss) ilustrují křivky grafů na obr. 11, 12, 13. Byla použita teorie z článku [7]. Vztah (23) by řešen numericky skriptem v MATLABu (skript je uveden v Příloze 4). Bylo simulováno vlákno typu SMF-28 s parametry uvedenými v tabulce 2. Odsimulovali jsme křivky závislosti na  $R$ ,  $\lambda$ ,  $NA$ . Podrobnější simulace budou rozebrány dále v experimentální části vztahující se přímo k návrhu měřicí aparatury.

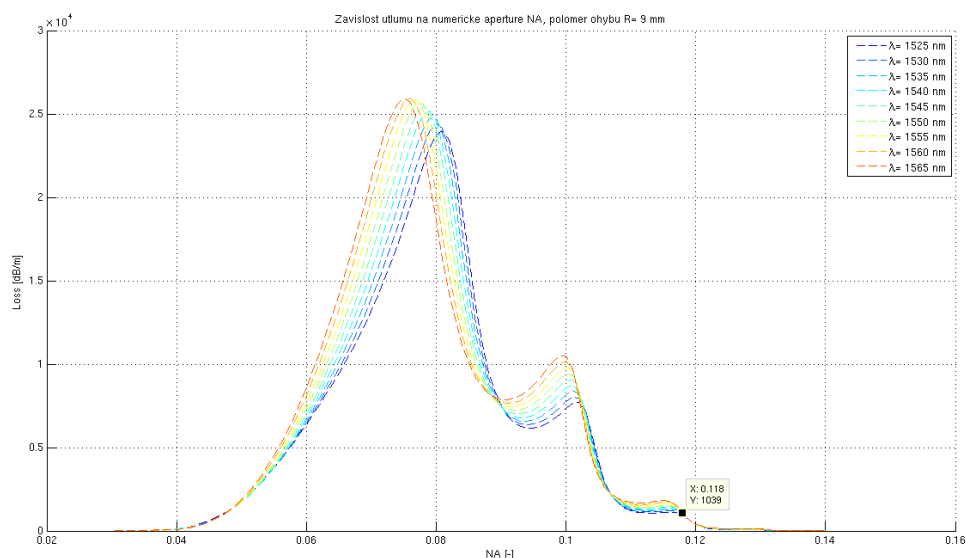


Obr. 11. Vypočítané ztráty ohybem v závislosti na vlnové délce  $\lambda$ ; poloměr ohybu  $R=16$  mm, numerická apertura  $NA=0,118$ , simulace počítá s jednou ochrannou vrstvou (tj. jádro, plášť a nekonečný obal)



Obr. 12. Vypočítané ztráty ohybem v závislosti na poloměru ohybu  $R$ ;

vlnová délka  $\lambda = 1310$  nm, numerická apertura  $NA = 0,118$



Obr. 13. Vypočítané ztráty ohybem v závislosti na numerické apertuře  $NA$ ; vlnová délka  $\lambda = 1525 - 1565$  nm, poloměr ohybu  $R = 9$  mm; podrobnější graf viz. Příloha 9

Útlum vlivem ohybu je silně vlnově závislý, např. při změně vlnové délky z 1500 nm na 1600 nm může vzrůst na troj- i vícenásobek decibelové hodnoty. Tato vlastnost může způsobit problém s detekcí vyzářeného výkonu na kratších vlnových délkách. Zpravidla se jedná o vlnové délky v pásmu O (z ang. Original band), tedy 1260 ~ 1360 nm. Problém s nízkým vyzářeným výkonem můžeme vyřešit např. snížením poloměru ohybu, jak ukazuje obr. 12.

Křivka útlumu jako funkce poloměru ohybu má oscilační charakter. To je způsobeno interferencí vlny odražené od svrchních rozhraní (plášť-obal, obal-vzduch) s vlnou jdoucí jádrem. Útlum dosahuje v rezonancích hodnot dvou- i vícenásobně vyšších (v dB) než v minimech, přitom jsou tyto extrémy vzdáleny jen o 10-20% hodnot poloměru. Hodnoty rezonančních maxim prudce rostou s klesajícím poloměrem ohybu.

Platí také známý poznatek, že útlum je tím vyšší, čím je vedení vlny slabší, tedy při menším rozdílu indexů lomu jádra a pláště (resp. numerické apertury  $NA$ ) či při malém průměru jádra vlákna. Jak ukazuje obr. 13, je útlum také silně závislý na numerické apertuře vlákna. Vyzařovací útlum lze pochopitelně navýšit také větším počtem navinutých závitů o daném poloměru ohybu.

## 4. Profesionální přístroje pro detekci živého vlákna

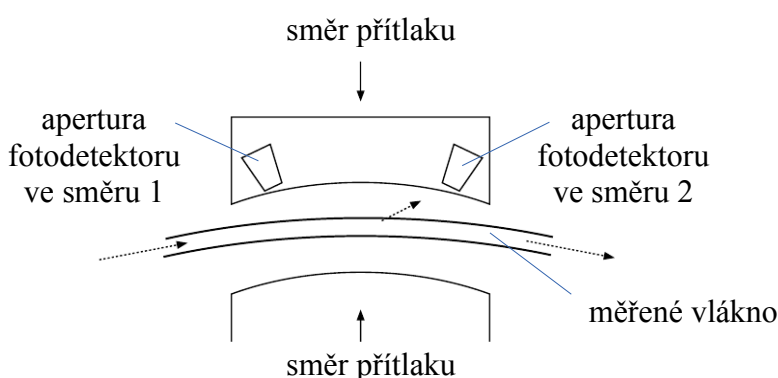
Jak bylo zmíněno v úvodu, jednou z praktických aplikací vyzařování vlivem ohybu optického vlákna je nedestruktivní měření úrovně výkonu, případně i jeho směru. Můžeme se setkat také s pojmem detekce živého vlákna (z angl. live fibre detection). Tento fenomén je natolik významný, že renomované firmy nabízejí přístroje, které využívají tohoto principu.

Funkční princip uvedených přístrojů se nám původně zdál být založen na využití ohybu vlákna, přesněji řečeno útlumu vznikajícím v homogenním ohnutém úseku. Proto bylo v předcházející kapitole detailněji popsáno chování vlákna při ohybu. Pro vedoucího i diplomanta však bylo překvapením, že zapůjčený přístroj EXFO LFD-250 spíše než spojitý oblouk vytvářel na vlákně ostré přechody. Zřejmě jsou tedy tyto přístroje založeny na využití tzv. transition loss (ztrát přechodem). I když to nebylo studováno, mohou být tyto ztráty méně vlnově závislé než tzv. pure bend loss.

Popisu společných rysů těchto přístrojů je věnována následující kapitola.

### 4.1 Obecné vlastnosti přístrojů

Zástupce přístrojů jsme vybrali tak, aby byly schopny vyčíslit procházející výkon, případně určit směr signálu. Přístroje jsou kalibrovány pro dvě nejpoužívanější vlnové délky jednovidových vláken 1310 nm a 1550 nm. Lze jimi měřit jednovidová vlákna s ochranou průměrů 250  $\mu\text{m}$ , 900  $\mu\text{m}$  a 3 mm (kabel s volně začleněným vláknem). Výrobci garantují vložné ztráty maximálně 1 dB. Právě i tyto malé vložné ztráty potvrzují naši domněnku, že pracují se ztrátami přechodem. Jednotlivé typy přístrojů se od sebe primárně liší jen rozsahem pro měření výkonu. Na obr. 14. je znázorněno principiální uspořádání části způsobující vyvážení výkonu, alespoň tak, jak to bylo patrné běžným pohledem. Přehledný souhrn vlastností přístrojů nabízí tab. 1.



Obr. 14. Princip funkce zmiňovaných přístrojů (převzato z katalogu EXFO LFD-250); mechanickým zatažením nebo stlačením přístroj ohne vlákno do předdefinovaného úhlu, čímž vyváže světlo do detektorů.

<b>Výrobce</b>	Sumitomo	AFL	EXFO
<b>Typ</b>	FTD-2FS	OFI400	LFD-250B
<b>Vlnový rozsah [nm]</b>	1310/1490/1550	800 - 1700	800 - 1700
<b>Měření výkonu</b>	ANO	ANO	ANO
<b>Rozsah [dBm]</b>	+5 ~ -60	+13 ~ -50	25 ~ -35
<b>Max. vložený útlum</b>	1 dB @ 1310 nm 3 dB @ 1550 nm 3 dB @ 1650 nm	-4,5 dB @ 1310 nm -5,0 dB @ 1550 nm	1 dB @ pro výkon větší -25 dBm
<b>Určení směru</b>	ANO	ANO	ANO
<b>Typy vláken</b>	250 μm, 500 μm , 3 mm	250 μm , 900 μm ; (vlákno SMF- 28/28E, CPC6 filmem, a 3 mm pláštěm),	250 μm <sup>1</sup> , 900 μm , 1,6 mm, 3 mm

Tab. 1. Srovnání typických vlastností přístrojů

---

<sup>1</sup> Tato hodnota není výrobcem uvedena, nicméně prakticky jsme vlákno změřili

## 5. Experimentální část

Zadáním diplomové práce je navrhnout funkční zařízení schopné detekovat a případně i měřit výkon procházející vláknem. Pro detekci signálu byla od počátku zamýšlena metoda detekce energie vyvážané ohybem. Za tímto účelem byla využita teorie z první části práce a nástroj numerických řešení Matlab. V navrženém simulátoru jsme nasimulovali pro konkrétní optické vlákno několik závislostí útlumu na vlnové délce. Parametrem simulací byl poloměr ohybu  $R$ . Výsledky simulace jsme ověřili měřením. Po ověření správnosti výsledků byly odsimulovány podrobné charakteristiky vlákna. Takto jsme získali představu o chování vlákna (výsledky budou představeny dále).

Kritickou částí experimentu je samotná detekce vyzářeného výkonu. Proto jsme nejdříve změřili směrovou vyzářovací charakteristiku jednoho závitu (ohyby kratší než jeden závit jsme vyloučili pro očekávaný nízký vyvážaný výkon). Podle směrového rozložení vyzářované energie pak byla navržena metoda její detekce. Navržené uspořádání pak bylo experimentálně ověřeno několika měřeními. Výsledky těchto měření byly porovnány se simulací a výsledky obdrženy z profesionálního přístroje.

### 5.1 Numerické výpočty útlumu v Matlabu

V návrhu je zapotřebí přesného návrhu poloměru oblouku, ve kterém dojde k vyvážání a následné detekci vlny. Při experimentálním zjišťování nejvhodnějšího poloměru ohybu  $R$  by bylo třeba provést velké množství měření. Mnohem snazší je však použít numerický model, ověřený několika měřeními a hledání poloměru pak realizovat pomocí něho. Numerické řešení musí odpovídat experimentálnímu měření a být podloženo teoretickým postupem. Protože článek [1] zmiňuje, že postačuje model vlákna s primární plastovou ochranou (obalem), jak jej popisuje [7], byl převzat výpočet dle [7], konkrétně integrální vztah (23) z kapitoly 3.

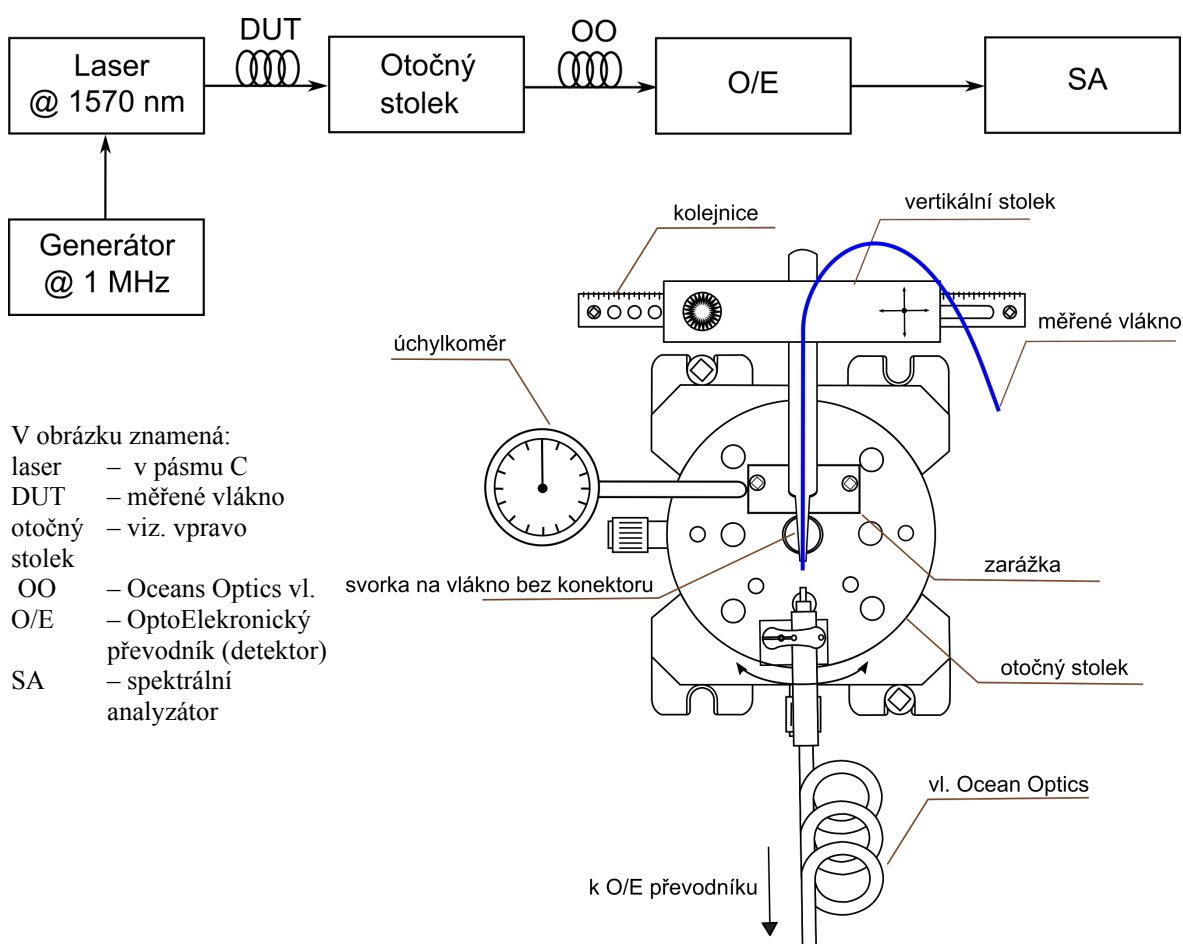
Simulace v MATLABu (skript uveden v Příloze 4 a 5) je členěna následovně:

Jádrem celého programu je funkce *ref7.m*, která řeší rovnici (23). Integrand v tomto vztahu je pro přehlednost rozčleněn do tří součinitelů. Samotná integrace je řešena funkcí *romberg.m* (Rombergova numerická integrační metoda, viz. Příloha 8). Veškeré pomocné funkce, jako například řešení  $\chi_2$ ,  $\chi_3$  [tj.  $\chi_2$ ,  $\chi_3$ ], jsou do kódu vkládány jako tzv. inline funkce (tzn. že přejímají veškeré parametry definované v celém *ref7.m*). Funkci *ref7.m* je nadřazena funkce *main.m*. Funkce *main.m* obsahuje volitelný přepínač *graf*, jenž přepíná oblasti simulace: 1 – Závislost útlumu na vlnové délce  $\lambda$ ; 2 – Útlum na poloměru ohybu  $R$ ; 3 – Útlum na numerické apertuře  $NA$ , kde parametrem je vlnová délka  $\lambda$ ; 4 – Útlum na poloměru ohybu  $R$ , kde parametrem je numerická apertura  $NA$ ; 5 – Útlum na poloměru ohybu  $R$ , kde parametrem je vlnová délka  $\lambda$ .



## 5.2 Experimentální ověření výpočtů

Abychom ověřili shodu výpočtu útlumu a reálného chování vlákna, provedli jsme experiment dle článku [1]. Cílem experimentu bylo ověření křivky z obr. 11, kap. 3.6. Současné byly provedeny výpočty dle článku [7]. Z kapitoly 3.6 víme, že výsledný útlum ohybem je závislý na numerické apertuře  $NA$  použitého vlákna. Aby byl výsledek simulace co nejpřesnější, musela být tato apertura změřena. Numerická apertura  $NA$  byla zjištěna klasickou metodou měření úhlového rozložení pole vyzařovaného měřeným vláknem, a to z úhlu akceptance zjištěného pro pokles intenzity na 5% (-13 dB) maxima. Blokové uspořádání uvádí obr. 15.



Obr. 15. Blokové schéma a uspořádání sestavy pro měření numerické apertury  $NA$ ; úchylkoměr slouží pro zpřesnění odečtu úhlu

Pro vzdálenost  $D$  mezi měřeným vláknem a vícevidovým vláknem sbírajícím výkon z určitého směru byla sledována podmínka měření v tzv. vzdálené oblasti  $d_0$ .

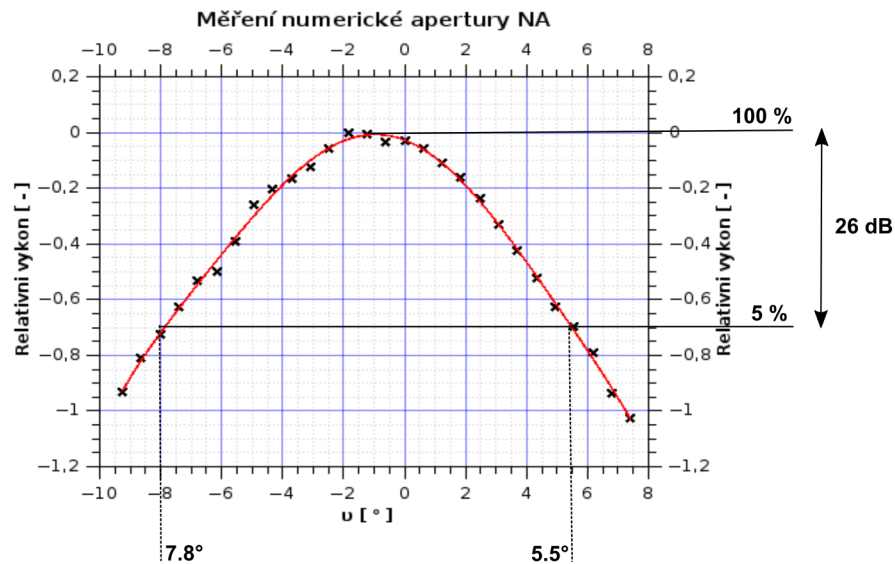
$$D \gg d_0 = \frac{4a^2}{\lambda} \quad (26)$$

kde  $D$  je vzdálenost detektoru od konce vlákna,  $a$  je poloměr jádra a  $\lambda$  vlnová délka. Z parametrů vlákna byla vzdálená zóna vyčíslena jako  $d_0 = 40 \mu\text{m}$ . Vzdálenost  $D$  byla zvolena 20 mm, tedy mnohonásobně větší, než udává kritérium.

Měřené vlákno bylo bez konektoru, rovně zalomené a očištěné. Délka vlákna 1 100 m postačovala k ustálení pole (zejména k potlačení vidů v plášti). Princip měření spočíval v natáčení čela měřicího vlákna Oceans Optics (vede vlnu k O/E převodníku, průměr jádra vlákna 200  $\mu\text{m}$ , délka vlákna 2 m) po definovaných úhlových krocích. Bohužel rozlišení úhlové stupnice otočného stolku (*Thorlabs XYR1*) byla nedostatečná.

Protože je obecně signál zachycený natáčeným vláknem vedoucím k detektoru (wattmetru či O/E převodníku) slabý se silným vlivem okolního světla, byl měřicí laser modulován 1 MHz (100% AM modulací) a na měřicí straně byl detekován po převodu O/E převodníkem pomocí elektrického spektrálního analyzátoru, který figuruje jako selektivní přijímač. Výkonová stupnice se však změnila kvůli tomu, že analyzátor určuje kvadrát z elektrického napětí, jež je již samo úměrné optickému výkonu, tj. nyní sledujeme pokles o  $2 \cdot 13 = 26 \text{ dB}$ .

Abychom ověřili metodu měření, bylo měření provedeno i pro vlákno se známou numerickou aperturou  $NA$ . Toto měření potvrdilo správnost metodiky. Můžeme tak prohlásit, že hodnota numerické apertury námi zkoumaného neznámého optického vlákna činí  $NA = 0,118$ . K této hodnotě budeme nadále vztahovat veškeré simulace. Na obr. 16. vidíme průběh z měření  $NA$  neznámého vlákna.

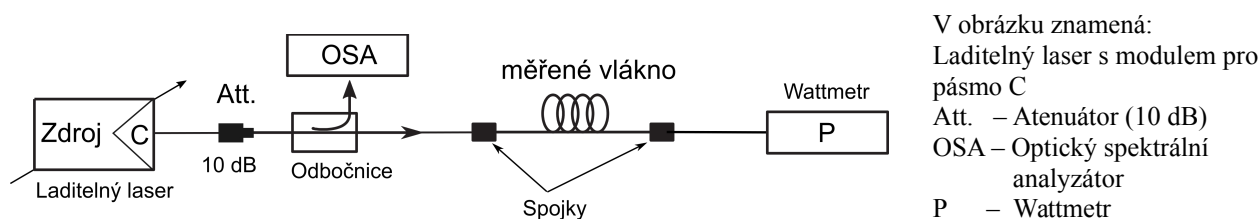


Obr. 16. Určení numerické apertury námi použitého vlákna standardu SMF-28; úhel akceptance  $\nu = 6,8^\circ$  (průměr z levého a pravého odečtu), výsledky měření jsou proloženy polynomem šestého stupně

### 5.3 Experimentální ověření útlumu ohybem

Vztah pro útlum ohybem (23) uvedený v kap. 3.5 bylo třeba ověřit experimentálně předtím, než bude využit k návrhu smyčky na vyvázání vlny z živého vlákna. Ověření bylo již předvedeno v individuálním projektu [11]. Stručně zde popíšeme experiment:

Vlákno SMF-28 s primární ochranou průměru 250  $\mu\text{m}$  a s navařenými koncovkami FC/PC v délce cca 2 metrů bylo navijeno na válečky různých průměrů. Do vlákna byl navázán signál laditelného laseru v pásmu C. Útlum ohybem byl vztažen ke stavu přímého vlákna. Nastavená vlnová délka byla ověřována spektrálním analyzátozem. Uspořádání uvádí obr. 17. Výsledky experimentu byly porovnávány se simulací, pro niž byly použity parametry z tab. 2 částečně převzaté z článku [1].



Obr. 17. Schéma zapojení experimentu k ověření numerických výpočtů útlumu; typová označení přístrojů jsou v Příloze 2.

Srovnávací numerický výpočet rovnice (23) v MATLABu používal tyto parametry vlákna:

Jádro	Plášť	Ochrana
$a = 4 \mu\text{m}$	$b = 62,5 \mu\text{m}$	$c = 58,5 \mu\text{m}$
$n_1 = 1,4504$	$n_2 = 1,4456$	$n_3 = 1,4786^2$

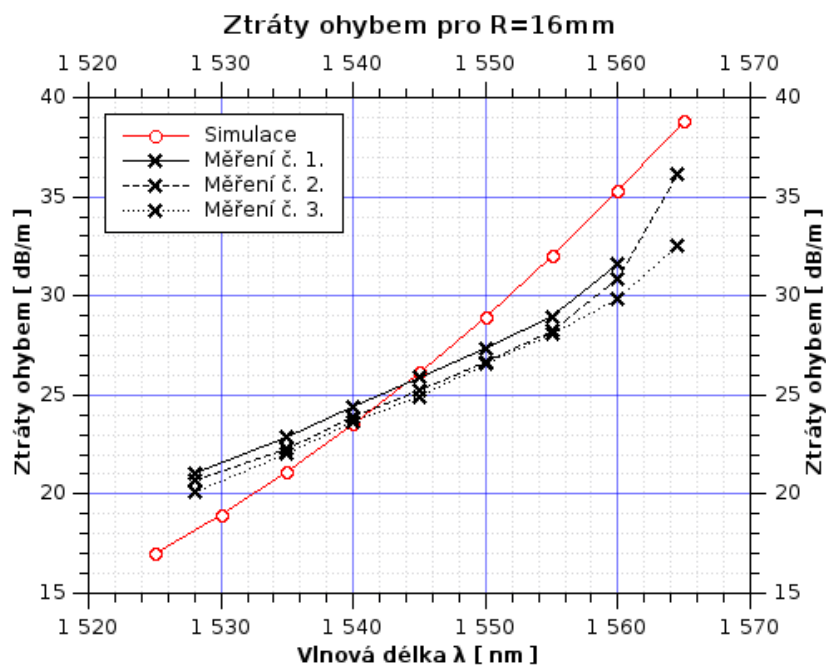
Tab. 2. Parametry simulovaného vlákna, index lomu  $n_2$  dopočítán ze změřené  $NA$ ;  $a$  je poloměr jádra,  $b$  je poloměr pláště,  $c$  je poloměr obalu

Z naměřených výkonů podle obr. 17 jsme určili měrný útlum ohybem v  $[\text{dB}/\text{m}]$  takto:

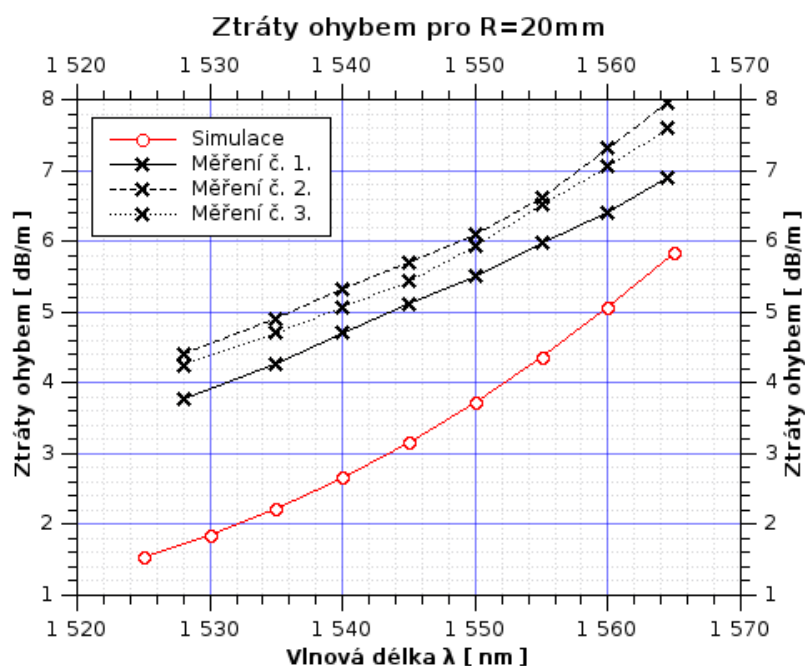
$$\alpha = \frac{(P_{\text{IN}} - P_{\text{OUT}})}{l} \quad (27)$$

$P_{\text{IN}}$  výkon do vlákna vstupující a  $P_{\text{OUT}}$  z vlákna vystupující,  $l$  délka navinutého vlákna. V rovnici (27) bychom měli ještě odečíst útlum přímého vlákna, avšak jeho vliv je mnohonásobně menší ( $< 0,2 \text{ dB}$ ), můžeme jej tedy zanedbat. Grafická porovnání naměřených závislostí s výsledky výpočtů uvádí obr. 18 a 19.

2 převzato z článku [1]



Obr. 18. Ztráty ohybem v závislosti na vlnové délce, kde parametrem je poloměr ohybu R=16 mm



Obr. 19. Ztráty ohybem v závislosti na vlnové délce, kde parametrem je poloměr ohybu R=20 mm

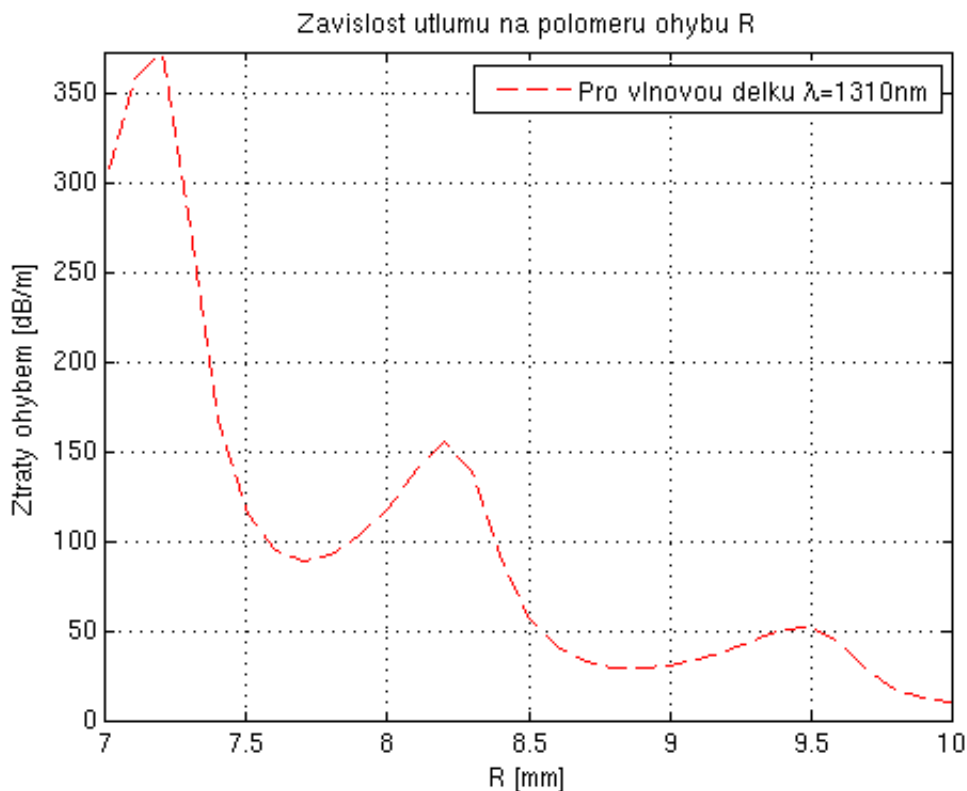
Na první pohled je patrné, že trendy křivek jsou obdobné. Hodnotami se simulace liší

nepatrně. Je možné, že námi použité vlákno má trochu odlišnou numerickou aperturu, případně jiný index lomu obalu  $n_3$ . Má-li být útlum ohybem vyšší, je nejjednodušším vysvětlením, že rozdíl indexů lomu jádra a pláště musí být nižší. Naše vlákno má tedy silnější vedení, než jaké bylo simulováno. Vzhledem k vybavení laboratoře nebyla možnost porovnat chování vlákna v širším rozsahu vlnových délek  $\lambda$  a pro více poloměrů  $R$  ohybových válečků. Přesto je zřejmé, že se vlákno chová v souladu s teorií popsanou v kapitole 3.

## 5.4 Hlubší rozbor chování vlákna pomocí simulací

Potvrdili jsme správnost numerického modelu měření. Pomocí numerického výpočtu provedeme simulace závislosti na poloměru ohybu, vlnové délce a numerické apertury tak, abychom poznali typické závislosti a mohli navrhnout aparaturu pro detekci.

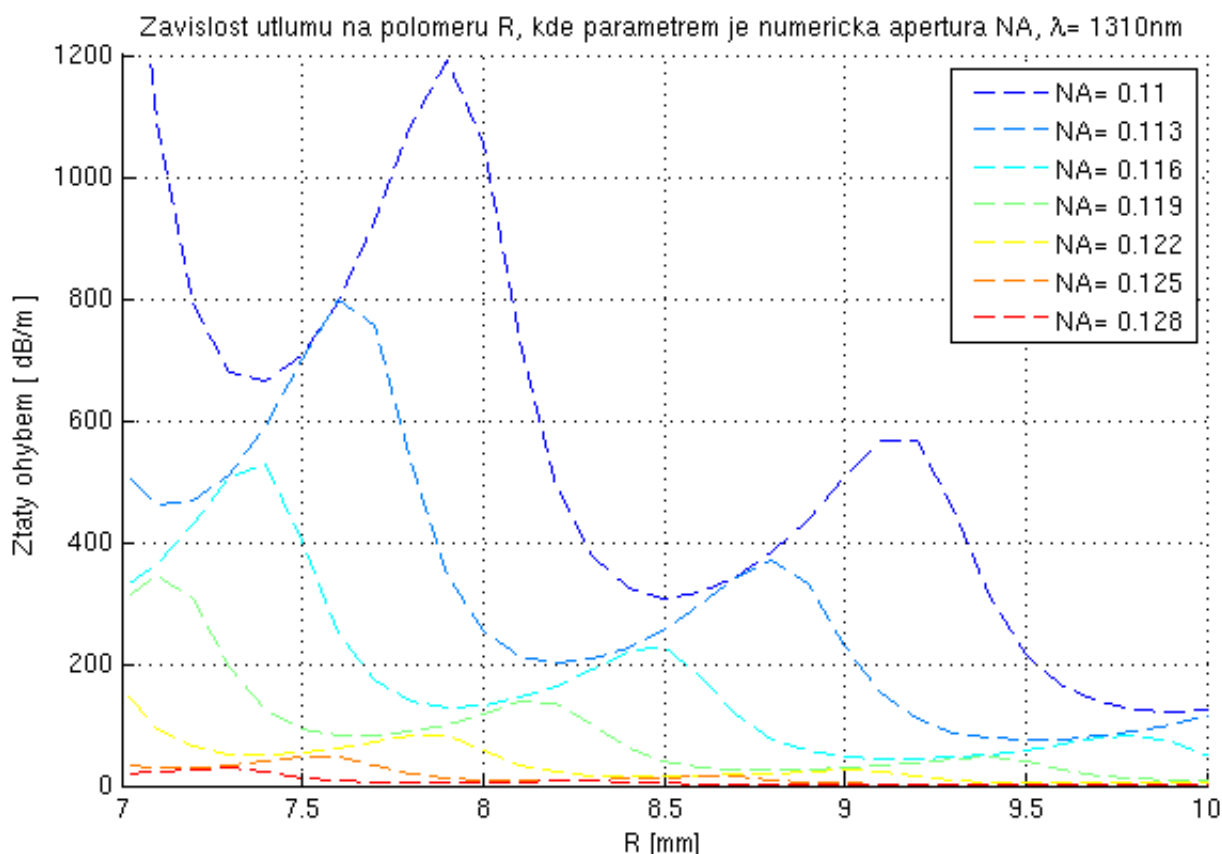
V prvé řadě musíme stanovit požadavky, které budeme od výsledného zařízení očekávat. Požadovali jsme schopnost detekovat různá optická vlákna tj. vlákna různých průměrů a o různých numerických aperturách  $NA$ . Požadujeme měření v širokém rozsahu vlnových délek (1300 nm – 1600 nm). Z grafu na obr. 18 vidíme, že vyvazování je silně vlnově závislé, a tak na dolním rozsahu vlnových délek nemusí být vyvázaný výkon dostačující. Proto budeme návrh vlnově koncipovat právě k těmto vlnovým délkám. Tím budeme mít automaticky zajištěnu funkčnost na vlnových délkách vyšších. Aby došlo k dostatečnému vyzařování na těchto délkách, volíme poloměr ohybu  $R < 8$  mm, přičemž snahou je umístit tento poloměr do jednoho z vyzařovacích maxim, viz. obr. 12., 20.



Obr. 20. Závislost útlumu na poloměru ohybu  $R < 8$  mm;

simulováno pro vlnovou délku  $\lambda=1310$  nm a numerickou aperturu  $NA= 0,118$ .

Jedná se však pouze o simulaci našeho neznámého vlákna. Nevypovídá ale o chování vláken jiných typů. Testovali jsme proto, zda a případně jak se mění charakter maxim pro různé typy vláken (respektive různé numerické apertury  $NA$ ). Výsledkem simulace je obr. 21.



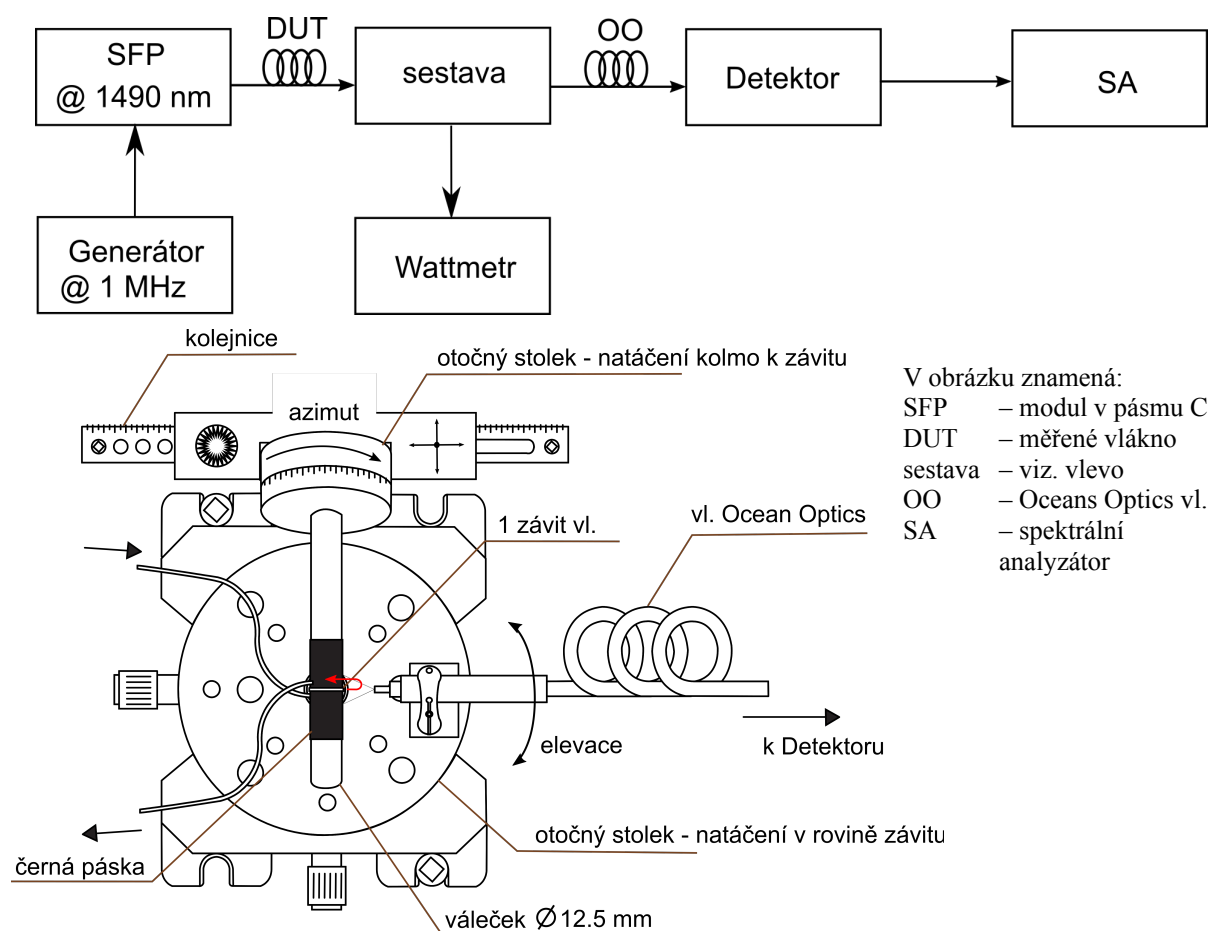
Obr. 21. Závislost vyzářeného výkonu na poloměru ohybu; parametrem je numerická apertura, vlnová délka  $\lambda= 1310$  nm

Na první pohled je patrné, že čím je silnější vedení vlny (vyšší  $NA$ ), tím více se maxima odchylní od svých hodnot směrem doleva. Prakticky tak může nastat situace, kdy pro jeden typ vlákna dostaneme maximum a pro druhý minimum (jako je tomu například v obr. 21., viz.  $NA=0,110$  a  $NA=0,116$ ). Z tohoto důvodu volíme kompromis, kdy výběrem poloměru ohybu umístíme křivku do maxima odpovídajícího největší očekávané numerické apertury. Ta může činit až  $NA=0,14$  (viz. Příloha 3 – Katalogový list Corning) pro jednovidová vlákna *SMF-28*. Vyzářený výkon tak může pro jiné typy vláken pouze vzrůst. Tímto je garantována detekovatelnost vyzářeného výkonu nezávisle na typu měřeného vlákna. Poloměr ohybu byl zvolen i s ohledem na mechanickou odolnost vlákna jako  $R= 7,7$  mm.

## 5.5 Vyzařování z ohnutého vlákna

Má-li být signál z ohnutého vlákna detekován, je třeba znát směrovou vyzařovací charakteristiku takového úseku. K tomu byl vytvořen jediný závit s pozvolně udělanými (a zakrytými) přechody na sloupeku průměru 12,5 mm. Sloupek i okolí byly pokryty černou páskou pro potlačení odrazů.

Sloupek, orientovaný horizontálně, bylo možno otáček okolo své osy (nazvěme tento úhel azimutem). V určité vzdálenosti od něj bylo čelo vícevidového vlákna, které zachycovalo vyzářenou energii a vedlo ji k O/E převodníku. Čelo bylo upevněno na otočný horizontálně orientovaný stolek, Thorlabs XYR1, tedy skenovalo pole v rovině kolmé na rovinu závitů (nazvěme tento úhel elevace). Pole tak bylo skenováno ve sférických souřadnicích podobně, jako tomu bývá u měření antén. Pro maximální dynamiku měření byl budící laser amplitudově modulován a výstup z převodníku sledován elektrickým spektrálním analyzátozem na modulační frekvenci úplně stejně, jako tomu bylo u měření numerické apertury.

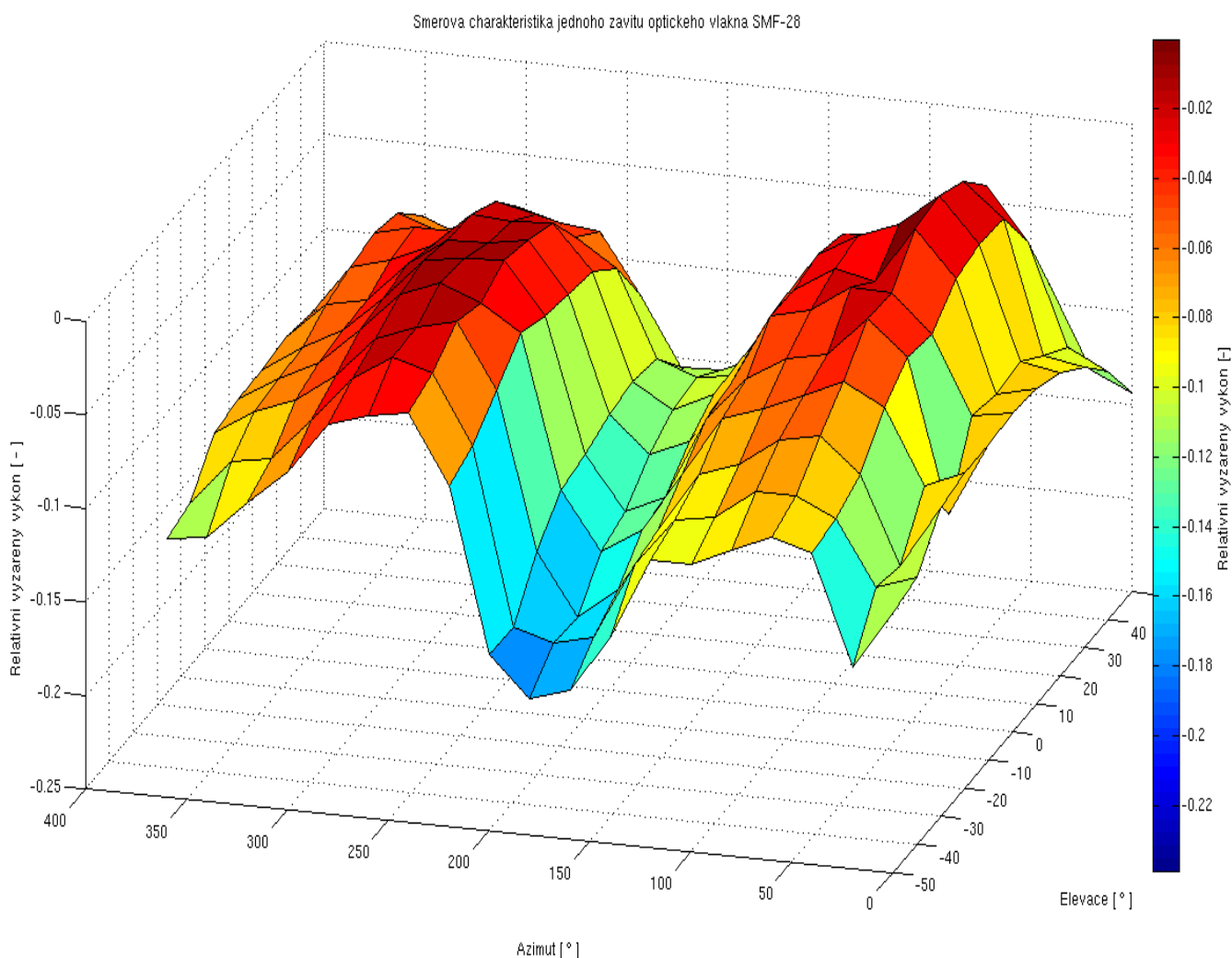


Obr. 22. Měření směrové charakteristiky závitů optického vlákna; seznam použitých přístrojů je v Příloze 2, v nákrese sestavy jde o pohled shora

K měření byl použit modul SFP výstupem modulovaným obdélníkovým signálem na frekvenci 1 MHz. Tento signál byl po převodu a zesílení detektorem (O/E převodníkem) sledován pomocí spektrálního analyzátoru. K zachycení svazku do určitého směru bylo použito vícevidové vlákno s průměrem jádra 600  $\mu\text{m}$  a délkou 2 m (Ocean Optics QP600-2-VIS-BX). Toto vlákno bylo umístěno ve vzdálenosti  $D=13$  mm od závitů. Pro daný úhel akceptance a vzdálenost  $D$  tak snímáme vždy oblast  $\pm 3\text{mm}$ . V azimutální rovině jsme měřili s krokem  $20^\circ$ , elevaci s krokem  $10^\circ$ .

Vstupní výkon z modulu SFP činil +3 dBm. Spektrální analyzátor byl nastaven následovně.  $CF=1\text{MHz}$ ,  $SPAN=10\text{kHz}$ ,  $RBW=300\text{kHz}$ ,  $AVG=2$  vz.,  $ATT=10$  dB,  $SWEEP TIME= 600$  ms. Šumový práh činil -104 dBm. Zisk O/E převodníku byl nastaven na +40 dB.

Grafické znázornění výsledku měření v okolí závitů je na obr. 23. Skript pro zpracování měřených dat je součástí Přílohy 8.



Obr. 23. Směrová charakteristika vlákna SMF-28;  
Je vyneseno relativní výkon jako funkce azimutu a elevace.



Z naměřeného rozložení lze učinit tyto závěry:

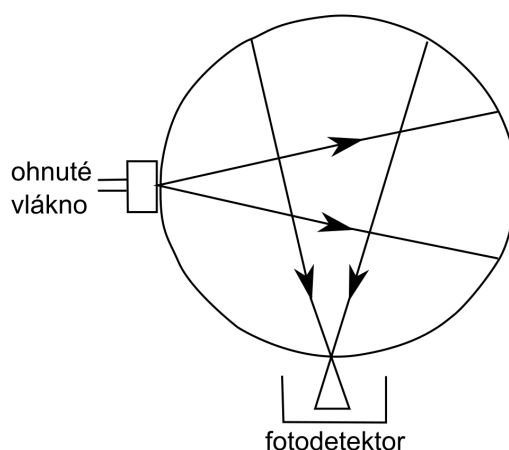
1. Pole vyzařované závitem má velkou rozbíhavost má velkou šířku svazku, azimutálně prakticky 360 stupňů, v rovině elevace určitě přes 80 stupňů.
2. Pole není závislé na azimutu, tj. při skenování v rovině závitu je úroveň jen málo proměnná.

Lze tedy konstatovat, že se jedná "zdroj" s dosti širokým prostorovým úhlem vyzařování.

## 5.6 Způsob detekce vyzářeného výkonu

Běžným způsobem detekce svazků je použití diodového detektoru. Čím širší je svazek, tím je potřeba větší plocha detektoru, případně se dá použít dodatečné optiky.

Kvůli zjištění z předcházející kapitoly, že je závit zářičem s velmi širokým svazkem ( $360^\circ$  v rovině závitu, přes  $80^\circ$  v rovině příčné), nebylo možno takového způsobu detekce použít. Z tohoto důvodu bylo navrženo použít tzv. integrační kouli.



Obr. 24. Integrační koule (převzato z [13] )

Integrační koule je speciálním optickým prvkem, který homogenizuje světlo ze zdroje, který září nehomogenně, tj. do různých směrů s různou výkonovou hustotou. Využívá k tomu lambertovsky rozptylující vnitřní povrch. Má dva otvory, jedním svítí dovnitř měřený zdroj (anebo se jím dovnitř zasouvá), druhým světlo vystupuje k detektoru. Obvykle se používá k určení zářivého toku (angl. radiant flux) neznámého zdroje ve srovnání se zdrojem referenčním. V naší aplikaci je použití takové koule nezbytné pro určení celkového výkonu vyzářeného smyčkou. Ten by pak měl být zachycen detektorem.

Jedním ze sledovaných parametrů koule je účinnost přenosu vstupující energie na výstup [12]

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \approx \frac{A_{OUT}}{4\pi r^2(1-R) + (A_{OUT} + A_{IN})R} \quad (28)$$

kde  $A_{IN}$ ,  $A_{OUT}$  jsou plochy otvorů,  $r$  je vnitřní poloměr koule a  $R$  je odrazivost vnitřního povrchu koule

Reálné integrační koule dosahují účinnosti maximálně 0,3 [12]. Celková plocha otvorů by neměla převyšovat 5% celkového povrchu [13]. Průměr koule je volen kompromisem, kdy malá hodnota sice vede na vyšší ozáření (angl. irradiance) výstupního otvoru a tedy k vyššímu detekovanému výkonu, avšak vyšší průměr přispívá k homogennějšímu rozložení světla a ke zmenšení vlivu otvorů [13]. Parametry koule silně závisí na materiálu vnitřního povrchu. Ideálně by měl všesměrově rozptylovat dopadající záření a mít odrazivost (angl. reflectance) blízkou jedné. Profesionální výrobky používají jako krycí vnitřní vrstvu bělobu tvořenou prášky z čistého  $TiO_2$  (oxid titaničitý, jen pro některé aplikace),  $BaSO_4$  (síran barnatý),  $MgO$  (oxid hořečnatý) nebo PTFE (polytetrafluoroetylen) [12]. Vyznačují se vysokou odrazivostí, tj. přes 99% a jsou vysoce lambertovské. Jediným rozdílem mezi nimi je způsob jejich nanášení, respektive definovaná tloušťka, v jaké se vrstva nanáší. Kvůli vysokým technologickým nárokům při výrobě jsou integrační koule dosti drahé, viz např. katalogy firem Edmund Optics či Thorlabs.

Je však známo [14], že lambertovské chování má také např. pěnový polystyren. Z tohoto materiálu se běžně vyrábějí dekorativní koule. Tímto způsobem je možno sestrojít výrazně levnější alternativu k integrační kouli. Tato alternativa byla zvolena i v této práci. Samozřejmě byla očekávána nižší účinnost přenosu podle (28).

## 5.7 Mechanické řešení a parametry navrženého detektoru

Do zakoupené koule (nakonec bylo zhotoveno více exemplářů) byly vyříznuty otvory orientované vůči sobě kolmo, aby bylo omezeno přímé ozařování detektoru zdrojem (viz obr. 24). Kvůli prosvítání a tedy citlivosti na okolní světlo byla koule opatřena alobalovou vnější vrstvou. Samotné vlákno, jehož zářivý tok (tedy vyzářený optický výkon) má být koulí měřen, bylo obtočeno okolo V-drážky, která je na fotografii na obr. 25 zachycena ze dvou pohledů.



Obr. 25. V-drážka pro uchycení optického vlákna o definovaném poloměru  $R = 7,7$  mm; navinout lze maximálně 3 závity, tzn. že navinutá délka vlákna  $l_{max} = 133$  mm

Drážka byla vytvořena z duté měděné modelářské trubičky o vnějším průměru 1,5 mm a vnitřním průměru 0,5 mm. Jako materiál byla zvolena měď pro snadnější tvarování. Několik málo závitů bylo navinuto na váleček požadovaného průměru. Následně byla pomocí frézy odstraněna svrchní vrstva trubičky. Přechod mezi přímým a ohnutým úsekem byl volen v souladu s teorií z kapitoly 3 (tj. pokud možno co nejplynulejší). Byla tím snaha eliminovat ztráty přechodem, nebo je alespoň potlačit na minimum.

K experimentálním účelům byly sestrojeny dva exempláře koulí. V obou případech šlo o koule s vnitřním polystyrenovým povrchem bez dalších úprav. Konstrukční rozdíly uvádí tab. 3. Kvalitu koulí jsme ověřili zasunutím konce zalomeného vlákna SMF-28, které bylo připevněno k ohnutému drátku. Otáčením a zasouváním/vysouváním drátku jsme hrubě testovali závislost detekovaného výkonu na směru záření vystupujícího ze zdroje (tedy našeho testovaného vlákna). To se projevilo jako kolísání výkonu, viz. tab. 4. Odpovídající účinnosti přenosu mezi vstupním a výstupním otvorem koule taktéž udává pro každou z koulí tab. 4.

Označení	Vnější průměr [ cm ]	Tloušťka stěny [ cm ]	Vnitřní povrch
Integrační koule I	20	1,5	Polystyren
Integrační koule II	20	2,5	Polystyren

Tab. 3. Přehled parametrů integračních koulí; použitý detektor SN122c s průměrem otvoru 8,7 mm

$\lambda$ [ nm ]	1310	1470	1570
Výkon do vlákna [ dBm ]	2,16	1,35	-2,48
Výkon detekovaný koulí I	-21,5 dBm $\pm$ 0,2 dB	-23,8 dBm $\pm$ 0,2 dB	-26,8 dBm $\pm$ 0,2 dB
Výkon detekovaný koulí II	-20,1 dBm $\pm$ 0,2 dB	-22,9 dBm $\pm$ 0,2 dB	-25,9 dBm $\pm$ 0,2 dB
Účinnost koule I [ dB ]	-23,66	-25,15	-24,32
Účinnost koule II [ dB ]	-22,26	-24,25	-23,42

Tab. 4. Změřené hodnoty pro vyhodnocení kvality koulí; snímáno detektorem *SNI22c* s průměrem otvoru 8,7 mm, kolísání udává změnu výkonu v závislosti na natočení/zasunutí vlákna

Z měření vyplývá, že vliv na účinnost koule má také tloušťka polystyrenové stěny. Pro další měření s vlákny byla vybrána koule II právě s ohledem na účinnost  $\eta$ , viz obr. 26. Fotodokumentace je součástí Přílohy 10.



Obr. 26. Zvolená integrační koule II

## 5.8 Výsledky detekce profesionálními přístroji

K profesionálnímu měření byl použit zapůjčený přístroj Exfo *LFD-250*, viz obr. 27. Změřeno bylo vlákno SMF-28 (G652) s různými druhy ochrany, a to průměrů 250  $\mu$ m,

900  $\mu\text{m}$  a 3 mm. Vlákna byla buzena trojicí *SFP* modulů (1310 nm na 70 km, 1470 nm na 50 km, 1570 nm na 50 km; s 1,25 Gbps). Vlnové délky byly voleny následovně. Délka 1310 nm je středem II. telekomunikačního okna, 1470 nm je dolním limitem III. okna a 1570 nm je zdroj s nejdelší vlnovou délkou dostupný v laboratoři. Pro otestování dynamiky a linearity byla úroveň měřeného signálu nastavována proměnným atenuátorem.



Obr. 27. Profesionální přístroj *LFD-250* (převzato z katalogu firmy *EXFO*)

Testované vlákno bylo vloženo do hlavy zařízení. Přístroj Exfo LFD-250 je vybaven motorovým pohonem deformační části a tak přístroj automaticky natvaroval vlákno tak, aby vyzařovalo k jedné ze dvou fotodiód. Ke konci testovaného vlákna byl pro kontrolu správnosti měření přístroje zapojen wattmetr. Při měření se detektor živého vlákna potýkal s problémy u SMF-28 s ochranou 250  $\mu\text{m}$ . V některých případech nebyl schopen ani detekovat správně směr šíření vlny. To bylo pravděpodobně způsobeno malým průměrem vlákna, které bylo pro přístroj složité vhodně natvarovat. Přístroj byl také testován na minimální detekovatelnou úroveň, pro kterou je schopen stanovit výkon ve vlákně. V tomto měření jsme využili již zapojený atenuátor. Výsledky měření jsou v tab. 5. Posledním měřením jsme ověřili vložné ztráty, jež výrobce garantuje < 1dB.

Ochrana	-----			900 $\mu\text{m}$			250 $\mu\text{m}$			3 mm		
$\lambda$ [ nm ]	1310	1470	1570	1310	1470	1570	1310	1470	1570	1310	1470	1570
Výkonové úrovně [ dBm ]	-1	-0,7	-6,1	-2	4,5	1	-10,5	-8	-7,5	-3,5	0,5	-1,5
	-8	-7,7	-13,1	-9	-2,5	-6	-17	-14,5	-14,5	-11	-6	-8,5
	-13	-12,7	-18,1	-14	-8	-11	-22,5	-20	-20	-15,5	-11	-13,5
	-18	-17,7	-23,1	-19	-13	-16,5	-27,5	-26	-26	-20,5	-16	-18,5
	-23	-22,7	-28,1	-24,5	-18	-21,5	-32,5	-39,5	-36,5	-25,5	-21	-23,5
	-28	-27,7	-33,1	-32	-24	-27,5	-37	----	----	-31	26,5	-28,5

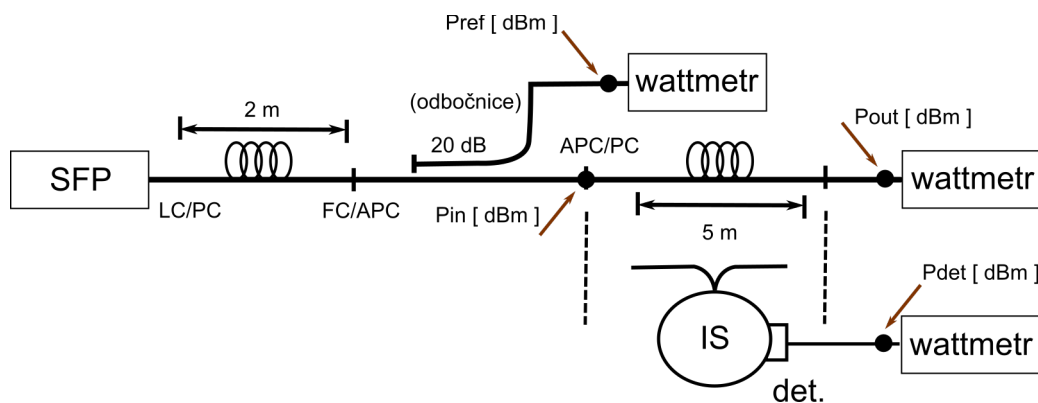
Tab. 5. Výkon indikovaný přístrojem EXFO LFD-250 jako funkce výkonové úrovně a vlnové délky; tučně zvýrazněné výsledky daných vlnových délek odpovídají hodnotám změřeným wattmetrem

Měřením bylo zjištěno, že je přístroj schopen měřit výkon v širokém rozsahu vlnových délek, a to až do mezní hodnoty  $-39,5$  dBm. I při takto nízkém výkonovém prahu výsledky odpovídají očekávaným hodnotám, viz. tabulka 5. Dále bylo měřením prokázáno, že vložný útlum skutečně není větší než garantovaný 1 dB.

## 5.9 Výsledky detekce navrženou aparaturou

Námi navržený způsob detekce živého vlákna, jak bylo popsáno výše, sestává z vytvoření smyčky na vlákně navinutím na stočenou drážku a zasunutím do integrační koule. Druhý otvor koule je zakončen detektorem Thorlabs S122C s indikační jednotkou Thorlabs PM100.

Uspořádání měření uvádí obr. 28. Odbočnice s referenčním wattmetrem slouží pro eliminaci případného kolísání výkonu zdroje. Další wattmetr sleduje výkon prošlý vláknem ( $P_{out}$ ) a poslední je zmíněný wattmetr s detektorem na kouli ( $P_{det}$ ). Použili jsme ty samé zdroje jako v přecházející kapitole. Měřeným vláknem byla smyčka SMF-28 s ochranou průměru  $250 \mu\text{m}$ . Změřené výkony udává tabulka tab. 6.



Obr. 28. Uspořádání aparatury pro měření útlumu ohybem za pomoci integrační koule

vlákno:	250 $\mu\text{m}$	ohnuté				
$\lambda$ [ nm ]	$P_{IN}$ [ dBm ]	$P_{OUT}$ [ dBm ]	$P_{DET}$ [ dBm ]	kolísání [ dB ]	Teoretický odhad $P_{DET}$ [ dBm ]	Rozdíl změř. a odhad. det. výkonu [ dB ]
1310	2,52	1,68	-30,8	$\pm 0,6$	-27,29	3,51
1470	2,75	-2,86	-27,3	$\pm 0,6$	-22,9	4,40
1570	-2,42	-20,8	-28,1	$\pm 0,6$	-25,9	2,20

Tab. 6. Naměřené a vypočítané hodnoty z měření integrační koule; hodnoty detekovány pro 2,75 závitů o průměru 15 mm, kolísání je způsobeno vlivem změny polohy smyčky

Detekovaný výkon by mohl dosahovat až hodnoty, o kterou klesne výkon prošlý. Kvůli konečné účinnosti koule bude však podstatně nižší. Tento teoretický odhadovaný výkon, nebyly-li by přítomné žádné další ztráty, uvádí předposlední sloupec tab. 6. Odhad detekovaného výkonu pro vlnovou délku 1310 nm a integrační kouli II probíhal následovně.

* výkon do vlákna	+2,52 [dBm]	+1,79 [mW]
* výkon z konektoru vlákna	+1,68 [dBm]	+1,47 [mW]
* ztracený výkon	-5,03 [dBm]	+0,31 [mW]
		(odečítáme údaje v mW)
* účinnost (přenos) koule	-22,26 [dB]	
* ztracený výkon + přenos ( teoretický odhad $P_{DET}$ )	-27,29 [dBm]	
* změřený detekovaný výkon $P_{DET}$	-30,80 [dBm]	

## 5.10 Zhodnocení navrženého způsobu detekce živého vlákna

Výsledky uvedené v předcházející kapitole uvedené výsledky ukazují, že signál procházející vláknem lze pomocí ohybu detekovat, což bylo ostatně očekáváno. Na rozdíl od profesionálních přístrojů je manipulace s vláknem složitější a vyžaduje mít k dispozici určitou vlnou délku vhodnou pro navinutí. Z naměřených výsledků lze učinit tyto závěry:

1. Jev útlumu ohybem je silně vlnově závislý. Na kratších vlnových délkách může být problém s detekcí signálu. Bez apriorní informace o vlnové délce bude mít takový detektor příliš velkou odchylku indikovaného procházejícího výkonu.
2. Kvůli nízké účinnosti přenosu zhotovené integrační koule se snižuje dynamika měření takovéhoho přístroje. Orientačně lze uvést, že je-li minimální detekovatelný výkon detektorem -50 dBm a vyzařoval-li by se celý vstupní výkon z vlákna a nebyly-li by přítomny žádné další ztráty, pak při přenosu koule -24 dB by byla mez detekce signálu kolem -26 dBm, v praxi samozřejmě ještě vyšší.

Vhodnější by bylo použít profesionální kouli. Použitá koule však dobře vyhovuje z hlediska nezávislosti na směru vyzařovaného paprsku. Použití profesionální koule by se významně projevilo na ceně výsledného přístroje.

3. Přístroj kvůli zmíněným ztrátám potřebuje vyšší vyvázaný výkon, buď navinutím na malý poloměr, anebo vytvořením více závitů. To se ve výsledku projeví jako nežádoucí vysoký vložný útlum.
4. Uvedený princip neumožňuje detekci směru průchodu signálu, což je funkce, kterou většina profesionálních přístrojů umožňuje.

5. Uvedené řešení je originální a funkční, i když s určitými omezeními. Je spíše demonstrací, že vlna vyvážaná při ohybu je detekovatelná a jak provést detekci spolehlivým způsobem. Ve srovnání s továrními přístroji však nedosahuje takových parametrů i užitého komfortu. Přesný princip továrních přístrojů je předmětem výrobních tajemství, tudíž je lze jen těžko reprodukovat. Testovaný přístroj EXFO LDF-250 dokonce vyvážání optimalizuje, jelikož disponuje motorovým posuvem, který zkouší různé podmínky vyvážání.



## 6. Závěr

V práci byly popsány jevy nastávající ve vlákně typu SI při mechanickém ohybu. Simulačním programem MATLAB byl vytvořen numerický výpočet útlumu v závislosti na poloměru ohybu. Experimentálně byla ověřena správnost výpočtů.

Je patrné, že přesnost stanovení útlumu je silně závislá na znalostech parametrů optického vlákna, především na znalosti geometrie vlákna (průměry oblastí) a indexů lomu pro jednotlivé oblasti vlákna. Z článku [1] také vyplývá, že příspěvky odražených vln od vyšších vrstev vlákna (tj. vyšší vrstvy obalu) jsou zanedbatelné a útlum je tak dominantně tvořen strukturou jádro-plášť-obal-vzduch.

Byla navržena metoda měření výkonu nedestruktivní metodou, jejíž princip je založen čistě na ztrátách ohybem. Naopak se ukazuje, že profesionální přístroje zřejmě využívají ztrát na ostrých ohybech vlákna, což je zřejmě technicky jednodušší.

Návrh experimentu zahrnoval simulaci vlákna na základě popsané teorie. Byl zvolen netradiční způsob detekce vyzářeného výkonu ze smyčky vlákna pomocí integrační koule. Bylo postaveno několik vzorků těchto koulí z běžně dostupných materiálů. Podle účinnosti byla vybrána jedna a v ní změřeno vlákno SMF-28 s ochrannou 250  $\mu\text{m}$  pro sadu vlnových délek. Na zapůjčeném profesionálním přístroji EXFO LFD-250 provedena série měření standardního vlákna SMF-28 s nejrůznějšími typy ochran.

Tato práce měla být spíše potvrzením možnosti využití ohybu k detekci tzv. živého vlákna, a proto se nepředpokládá další vývoj pro nasazení v měřicí technice. Ilustruje však mnohé aspekty tohoto druhu měřicí techniky.

## 7 Použitá literatura

- [1] Wang Q., Farrell G., a Freir T., *Theoretical and experimental investigations of macro-bend losses for standard single mode fibers*, Opt. Express, vol. 13, číslo 12, str. 4476–4484, 2005.
- [2] Novotný K., *Optická komunikační technika*, Česká technika – ČVUT , 3 vyd., Praha, 2007, ISBN 978-80-01-03920-5.
- [3] Iizuka K., *ELEMENTS OF PHOTONICS Volume II.*, Wiley Interscience, New York, 2002, ISBN 0-471-40815-8.
- [4] Katsifolis J., Huntington S. T., Ankiewicz A., Love J., a Cahill L. W., *Transition Loss in Bent Waveguides and Fibres*, 11 European Conference on Integrated Optics Proceedings, ČVUT , vol. 1., str.. 327–330, 2003.
- [5] Gambling W. A., Matsumura H., Ragdale C. M., a Sammut R. A., *Measurement of radiation loss in curved single-mode fibres*, vol. 2, str. 130-134, 1978.
- [6] Gambling W., Payne D. N., Matsumura H., a Dyott R. B., *Routine characterisation of single-mode fibres*, Electron. Lett., vol. 12, číslo. 21, str. 546–547, 1976.
- [7] Faustini L. a Martini G., *Bend loss in single-mode fibers*, J. Light. Technol., vol. 15, číslo. 4, str. 671–679, 1997.
- [8] Koška P., Peterka P., a Doya V., *Numerical Modeling of Pump Absorption in Coiled and Twisted Double-Clad Fibers*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 22, číslo. 2, str. 55–62, 2016.
- [9] Valiente I. a Vassallo C., *New formalism for bending losses in coated single mode fibres*, Electron. Lett., vol. 25, číslo. 22, str. 1544–1545, 1989.
- [10] Renner H., *Bending Losses of Coated Single-Mode Fibers: A Simple Approach*, J. Light. Technol., vol. 10, číslo. 5, str. 544–551, 1992.
- [11] Valko M., *Vliv ohybů na jednovidové vlákno – individuální projekt*, ČVUT FEL, Praha, 2016.
- [12] Hobbs P. C. D., *Coatings, Filters, and Surface Finishes*, v *Building Electro-Optical Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2008, str. 180–207.
- [13] Labsphere, *Technical Guide: Integrating Sphere Theory and Applications*,” Man. Integr. Sph., str. 1–19, 2011.
- [14] Leloup F. B., Leyre S., T. Van den Abeele a Hanselaer P., *Design of an inexpensive integrating sphere laboratory setup for the optical characterization of a light source*, ETOP 2015 Proceedings, 2015.

## Příloha 1: Vlastnosti Airyho funkcí

V kapitole 3.2.1 byly použity tzv. Airyho funkce. Tyto funkce odpovídají řešení tzv. Airyho rovnice (tj. homogenní diferenciální rovnice druhého řádu):

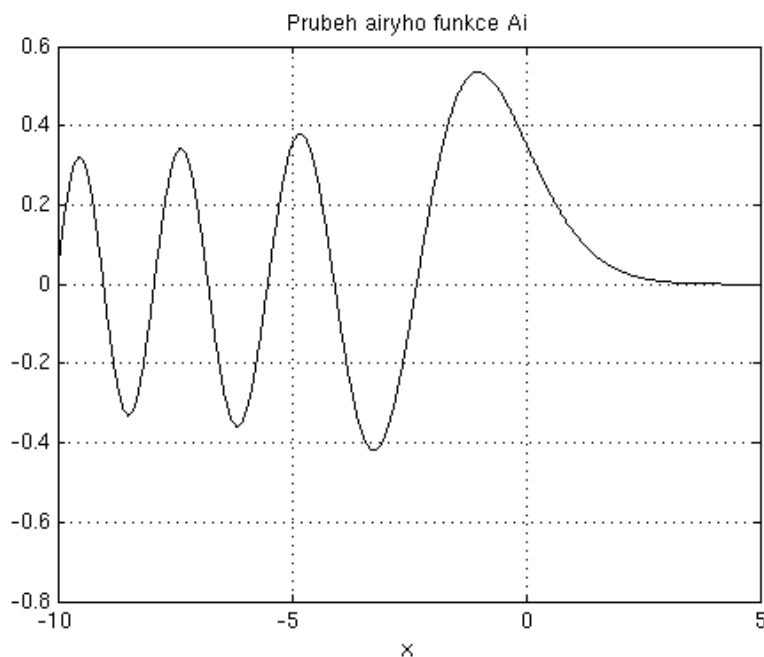
$$y'' - xy = 0$$

Řešení rovnice je ve tvaru:

$$y = \int_C e^{xz} v(z) dz$$

Integrujeme přes  $C$ , tak aby funkce  $v(z)$  ve svých mezích vymizela. Z tohoto důvodu musí jít meze přes komplexní rovinu. Z podmínek výše a uplatnění symetrie docházíme k řešení Airyho funkce  $Ai$ :

$$Ai(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{+i\infty} e^{xz - \frac{z^3}{3}} dz$$

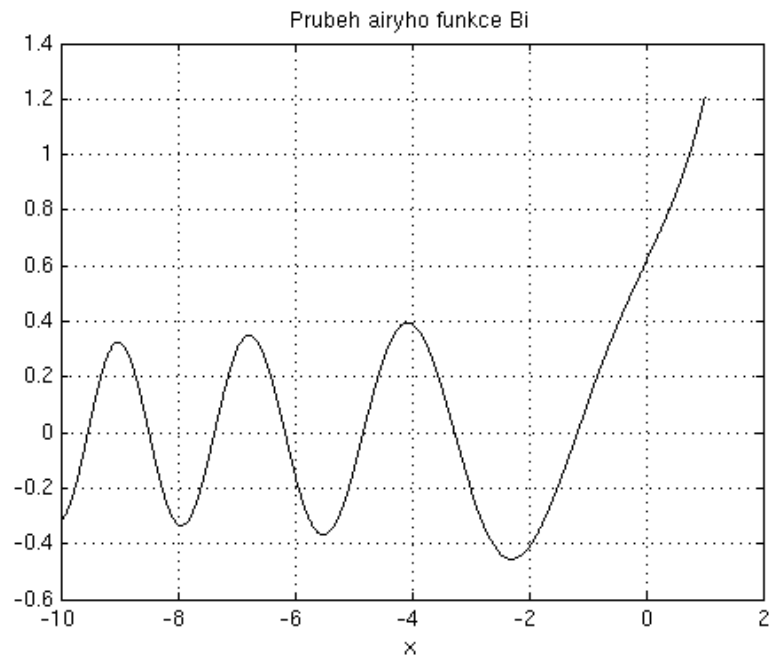


Obr. 1. Průběh Airyho funkce  $Ai(x)$

a  $Bi(x)$  lineárně nezávislou na  $Ai(x)$ :

$$Bi(x) = i j^2 Ai(j^2 x) - i j Ai(jx)$$

kde  $1, j, j^2$  jsou kořeny řešení jednoty (viz. hledání Moivreových čísel)



Obr. 2. Průběh Airyho funkce  $Bi(x)$

## Příloha 2: Seznam použitých přístrojů

Použitý přístroj	Typ/ Označení
SFP @ 1570 nm	
Generátor funkcí	Motech FG 503
Otočný stolek	XYR1/M
Detekční vlákno	Ocean Optics QP200-2-VIS-BX
OptoElektronický převodník (detektor)	Thorlabs PDA10C5
Spektrální analyzátor	Advantest R3131A do 3 GHz
Napájecí zdroj	TTI CPX 400DP

Tab. 1. Seznam použitých přístrojů v zapojení měření *NA*

Použitý přístroj	Typ/ Označení
Laditelný zdroj v pásmu C	IDphotonics CoBrite DX4
Atenuátor	FC/APC 10 dB
Odbočnice	FC/APC, 1:99
Wattmetr	Thorlabs PM20CH
Optický spektrální analyzátor (OSA)	Exfo FTB-500
Modul k OSA	FTB-5240B-EI

Tab. 2. Seznam použitých přístrojů v experimentu ověření numerických výpočtů útlumu

Použitý přístroj	Typ/ Označení
SFP @ 1490 nm	
Generátor funkcí	Motech FG 503
Otočný stolek (v rovině závitů)	XYR1/M
Otočný stolek (kolmo k závitům)	CR1/M
Detekční vlákno	Ocean Optics QP600-2-VIS-BX
OptoElektronický převodník (detektor)	Thorlabs PDA10C5
Spektrální analyzátor	Advantest R3131A do 3 GHz
Napájecí zdroj	TTI CPX 400DP

Tab. 3. Seznam použitých přístrojů v zapojení měření směrové charakteristiky závitů

<b>Použitý přístroj</b>	<b>Typ/ Označení</b>
SFP @ 1310, 1470, 1570 nm	
Odbočnice	FC/APC, 20 dB
Wattmetr (referenční)	EXFO FOT02/Thorlabs PM20
Wattmetr (zakončení vlákna)	Thorlabs PM20
Detektor	Thorlabs S122C
Wattmetr (připojený k detektoru)	Thorlabs PM100

Tab. 4. Seznam použitých přístrojů v zapojení aparatury pro měření útlumu integrační koulí

# Příloha 3: Katalogový list vlákna SMF-28 od firmy Corning

Převzato z: <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/SMF-28%20Ultra.pdf> <cit. 3.2.2017>

## Optical Specifications

### Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	≤ 0.32
1383**	≤ 0.32
1490	≤ 0.21
1550	≤ 0.18
1625	≤ 0.20

\* Alternate attenuation offerings available upon request.  
 \*\* Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

### Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. $\lambda$ (nm)	Max. $\alpha$ Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.03
1525 – 1575	1550	0.02

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength ( $\lambda$ ) by more than the value  $\alpha$ .

### Macrobend Loss

Mandrel Radius (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
10	1	1550	≤ 0.50
10	1	1625	≤ 1.5
15	10	1550	≤ 0.05
15	10	1625	≤ 0.30
25	100	1310, 1550, 1625	≤ 0.01

\*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified radius.

### Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

### Cable Cutoff Wavelength ( $\lambda_{cc}$ )

$\lambda_{cc} \leq 1260$  nm

### Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD ( $\mu$ m)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

### Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm·km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength ( $\lambda_0$ ): 1304 nm ≤  $\lambda_0$  ≤ 1324 nm

Zero Dispersion Slope ( $S_0$ ):  $S_0 \leq 0.092$  ps/(nm<sup>2</sup>·km)

### Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/√km)
PMD Link Design Value	≤ 0.04*
Maximum Individual Fiber PMD	≤ 0.1

\*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD<sub>0</sub>). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled.



## Dimensional Specifications

Glass Geometry		Coating Geometry	
Fiber Curl	≥ 4.0 m radius of curvature	Coating Diameter	242 ± 5 μm
Cladding Diameter	125.0 ± 0.7 μm	Coating-Cladding Concentricity	< 12 μm
Core-Clad Concentricity	≤ 0.5 μm		
Cladding Non-Circularity	≤ 0.7%		

## Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation
		1310 nm, 1550 nm, and 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	≤ 0.05
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C up to 98% RH	≤ 0.05
Water Immersion	23°C ± 2°C	≤ 0.05
Heat Aging	85°C ± 2°C	≤ 0.05
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.05

\*Reference temperature = +23°C  
 Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

## Mechanical Specifications

### Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress ≥ 100 kpsi (0.69 GPa).\*

\*Higher proof test levels available.

### Length

Fiber lengths available up to 63.0 km/spool.

## Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter	8.2 μm
Numerical Aperture	0.14 NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.
Effective Group Index of Refraction ( $N_{eff}$ )	1310 nm: 1.4676 1550 nm: 1.4682
Fatigue Resistance Parameter ( $N_d$ )	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs. (3N) Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1310 nm: -77 dB 1550 nm: -82 dB

**CORNING**

Corning Incorporated  
 One Riverfront Plaza  
 Corning, NY 14831 U.S.A.  
 Ph: 607-248-2000 (U.S. and Canada)  
 +44-1244-525-320 (Europe)  
 Email: cofic@corning.com  
 www.corning.com/opticalfiber

Corning, SMF-28 and SMF-28e+ are registered trademarks of Corning Incorporated, Corning, NY.  
 © 2014 Corning Incorporated. All Rights Reserved.



## Příloha 4: Hlavní program v Matlabu

Simulace vlnové závislosti útlumu, simulace závislosti útlumu na poloměru ohybu, simulace závislosti útlumu na numerické apertuře NA, kombinované simulace útlum na poloměru ohybu kde je parametr NA a útlum na poloměru kde je parametr vlnová délka

```
% Vliv ohybu na standardni jednovidove telekomunikacni vlakno SMF-28
```

```
% Ing. Jan Sístek, Ph. D., Bc. Martin Valko
```

```
% katedra elektromagnetickeho pole
```

```
% CVUT v Praze, 2017
```

```
clc;
clear all;
close all;
precise=5e-5;
graf=4;

% presnost s jakou je urcena horni mez integralu
% 1 - utlum na vlnove delce;
% 2 - utlum na polomeru ohybu;
% 3 - utlum na numericke aperture NA, kde
    parametrem je vlnova delka
% 4 - utlum na polomeru ohybu, kde parametrem je
    numericka apertura NA
% 5 - utlum na polomeru ohybu , kde parametrem je
    vlnova delka

% NASTAVENI VYCHOZICH HODNOT
% 1
if(graf==1)
R=8.5e-3;
lambda_start=1310e-9;
lambda_stop=1330e-9;
step=5e-9;
NA=0.118404;
end

% 2
if(graf==2)
lambda=1310e-9;
R_start=7e-3;
R_stop=10e-3;
step=0.1e-3;

NA=0.118404;
end

% 3
if(graf==3)
R=9e-3;
lambda_start=1550e-9;
lambda_stop=1565e-9;
stepl=5e-9;

NA_start=0.03;
NA_stop=0.140;
step=0.001;
end

end
```

```

% 4
if(graf==4)
NA_v=[0.110 0.113 0.116 0.119 0.122 0.125 0.128]; % definuj pro jake numericke
apertury NA chces vypocet provest
lambda=1310e-9; % zadej pro jakou vlnovou delku chces
vypocet provest
R_start=7.0e-3; % pocatecni hodnota polomeru ohybu
R_stop=10e-3; % konecna hodnota polomeru ohybu
step=0.1e-3; % krok vypoctu
end

% 5
if(graf==5)
lambda_v=[1310 1470 1550 1570 1625].*10^-9; % zadej pro jakou vlnovou delku
chces vypocet provest
R_start=7e-3; % pocatecni hodnota polomeru ohybu
R_stop=10e-3; % konecna hodnota polomeru ohybu
step=0.05e-3; % krok vypoctu
precise=5e-5; % presnost s jakou je urcena horni mez
integralu
NA=0.115804; % numericka apertura testovaneho vlakna
end

% -----
% -----
if(graf==1) % UTLUM V ZAVISLOSTI NA VLNOVE DELCE

lambda=lambda_start; % promenna vlnove delky

for(i=1:((lambda_stop-lambda_start)*10^9)/(step*10^9)+2) % upravuj 2 pokud chces
rozsirit vlnovou delku

n1=1.4504; % index lomu jadra
n2=sqrt(n1.^2-NA.^2);

if(n2<n1) % podminka pro vedeni vlny
zeta=(1:precise:200).*1e4; % transformovana souradnice 'y' ve FT
pr=7; % velikost ronbergovi tabulky (zvys, dokud
se hodnoty posledni a predposledni
nebudou rovnat)

[posledni, predposledni,loss,chi2,chi3,ch2,ch3,citatel]=ref7(R,lambda,zeta,pr,n2);
ch2s(1,i)=ch2; % vektor data-pointeru pro reseni chi2
ch3s(1,i)=ch3; % vektor data-pointeru pro reseni chi3
losss(1,i)=abs(loss); % vektor ztrat (pro jednotlivé vlnové delky)
chi2s(i,:)=chi2; % vektor chi2 (pro jednotlivé vlnové delky)
chi3s(i,:)=chi3; % vektor chi3 (pro jednotlivé vlnové delky)
else
fprintf('Spatne nastavene indexy lomu!')
break % prerus vypocet nepltati-li podminka
n2<n1
end
lambdav(1,i)=lambda; % vektor vlnovych delek
lambda=lambda+step; % nasledujici vlnova delka
end

figure(1) % zavislost utlumu na vlnove delce
plot(lambdav*10^9,(losss/1),'--r')

```

```

grid on
xlabel('\lambda [nm]')
ylabel('Loss [dB/m]')
title(['Zavislost utlumu na vlnove delce \lambda, R=' num2str(R*1e3),'mm', ', ',
NA=', num2str(NA)])
legend('Struktura s jednou vrstvou')
end

% -----
% -----
if(graf==2) % UTLUM V ZAVISLOSTI NA POLOMERU OHYBU

R=R_start;

for(i=1:((R_stop-R_start)*10^3)/(step*10^3)+2) % upravuj 2 pokud chces rozsirit
polomer ohybu

n1=1.4504; % index lomu jadra
n2=sqrt(n1.^2-NA.^2);

if(n2<n1) % podminka pro vedeni vlny
zeta=(1:precise:200).*1e4; % transformovana souradnice 'y' ve
FT
pr=7; % velikost ronbergovi tabulky (zvys,
dokud se hodnoty posledni a
predposledni nebudou rovnat)

[~,~,loss,~,~,~,~,~]=ref7(R,lambda,zeta,pr,n2);
losss(1,i)=abs(loss); % vektor ztrat (pro jednotlivé vlnové
delky)

else
fprintf('Spatne nastavene indexy lomu!')
break % prerus vypocet neplytati-li
podminka n2<n1

end
Rv(1,i)=R; % vektor vlnovych delek
R=R+step; % nasledujici vlnova delka
end

figure(1) % zavislost utlumu na polomeru
ohybu

plot(Rv*10^3,losss,'--r')
grid on
xlabel('R [mm]')
ylabel('Ztraty ohybem [dB/m]')
title(['Zavislost utlumu na polomeru ohybu R'])
axis([R_start*1e3 R_stop*1e3 0 max(losss)])
legend(['Pro vlnovou delku \lambda=' num2str(lambda*1e9),'nm'])
end

% -----
% -----
if(graf==3)

lambda=lambda_start;

for(k=1:((lambda_stop-lambda_start).*1e9)/(stepl.*10^9)+1)
NA=NA_start;
for(i=1:((NA_stop-NA_start).*1e3)/(step.*10^3)+1) % upravuj 1 pokud chces rozsirit

```

```

numerickou aperturu

n1=1.4504;
n2=sqrt(n1.^2-NA.^2);

n2v(1,i)=n2;
if(n2<n1)
zeta=(1:precise:200).*1e4;

pr=7;

[~,~,loss,~,~,~,~,~]=ref7(R,lambda,zeta,pr,n2);
losss(k,i)=abs(loss);

else
    fprintf('Spatne nastavene indexy lomu!')
    break

end
NAv(k,i)=NA;
NA=NA+step;
end
lambdav(1,k)=lambda;
lambda=lambda+step;
end

close all
clc
for(i=1:k)
figure(1)

hold on
col=jet(k);
plot(NAv(i,:),losss(i,:), 'color',col(i,:), 'LineStyle','--')
grid on
xlabel('NA [-]')
ylabel('Loss [dB/m]')
title(['Zavislost utlumu na numericke aperture NA, polomer ohybu R= '
num2str(R*1e3), ' mm'])
legend(['\lambda= ' num2str(lambdav(1,1)*1e9), ' nm'], ['\lambda= '
num2str(lambdav(1,2)*1e9), ' nm'], ['\lambda= ' num2str(lambdav(1,3)*1e9), ' nm'],
['\lambda= ' num2str(lambdav(1,4)*1e9), ' nm'], ['\lambda= '
num2str(lambdav(1,5)*1e9), ' nm'], ['\lambda= ' num2str(lambdav(1,6)*1e9), ' nm'],
['\lambda= ' num2str(lambdav(1,7)*1e9), ' nm'], ['\lambda= '
num2str(lambdav(1,8)*1e9), ' nm'], ['\lambda= ' num2str(lambdav(1,9)*1e9), '
nm'],'Location','NorthEast')
end
end

% -----
% -----
if(graf==4)

for(j=1:length(NA_v))
R=R_start;

NA=NA_v(1,j);

```

```

for(i=1:((R_stop-R_start)*10^3)/(step*10^3)+2) % upravuj 2 pokud chces rozsirit
                                                polomer ohybu, cyklus pro vypocet
                                                zvaislosti utlumu na polomeru ohybu

n1=1.4504; % index lomu jadra
n2=sqrt(n1.^2-NA.^2); % 1.4446; n2<n1 !!! (indexy lomu pro
                        namerene hodnoty)

if(n2<n1) % podminka pro vedeni vlny
zeta=(1:precise:200).*1e4; % transformovana souradnice 'y' ve FT
pr=7; % velikost ronbergovi tabulky (zvys, dokud
      se hodnoty posledni a predposledni
      nebudou rovnat)

[~,~,loss,~,~,~,~,~]=ref7(R,lambda,zeta,pr,n2); % vypocet vysledneho utlumu
losss(j,i)=abs(loss); % ohybem pro prislusne parametry
                        % vektor ztrat (pro jednotlivy vlnove delky)

else
    fprintf('Spatne nastavene indexy lomu!')
    break % prerus vypocet nepltati-li podminka
          n2<n1
end
Rv(j,i)=R; % vektor polomeru
R=R+step; % nasledujici polomer

end
[maximum_o(j,:) pointer_o(j,:)] = max(losss(j,:)); % urceni maxima a jejio ukazatele
                                                    pro jednotlivy faze simulace (tj. pro kazdou
                                                    sadu hodnot prislusne NA)
R_o(j,:)=(Rv(j,pointer_o(j,:))).*1e3; % urceni polomeru ohybu pro maximalni
                                       utlum

end

% vykresleni normovaneho grafu pro volbu graf==4
close all
check=0; % pomocna kontrolni promenna zda je
          normovani provedeno korektně

%for(kk=1:length(NA_v))
%losss(kk,:)=losss(kk,:)/maximum_o(kk,:); % normovani maximalni hodnotou
%[maximum_n(kk,:) pointer_n(kk,:)] = max(losss(kk,:)); % kontrola zda odpovidaji
% ukazatele, tedy zda bylo normovani
% provedeno pro spravne hodnoty

%end

for(kk=1:length(NA_v))
figure(1) % zavislost utlumu na polomeru
          ohybu R, s parametrem NA

hold on
col=jet(length(NA_v));
plot(Rv(kk,:).*10^3,losss(kk,:), 'color',col(kk,:), 'LineStyle','--')
grid on
xlabel('R [mm]')
ylabel('Ztaty ohybem [ dB/m ]')
axis([7 10 0 1200])
legend(['NA= ' num2str(NA_v(1,1))],[ 'NA= ' num2str(NA_v(1,2))],[ 'NA= '
num2str(NA_v(1,3))],[ 'NA= ' num2str(NA_v(1,4))],[ 'NA= ' num2str(NA_v(1,5))],[ 'NA= '
num2str(NA_v(1,6))],[ 'NA= ' num2str(NA_v(1,7))])
title(['Zavislost utlumu na polomeru R, kde parametrem je numericka apertura NA,

```

```

\lambda= ' num2str(lambda.*1e9), 'nm']

%if(pointer_o==pointer_n)           % odpovida-li hodnota stareho ukazatele (
%check=check+1;                    % o-old) a noveho ukazatele(n-new)
%else                                % zvys hodnotu promenne check o 1
%check=check-1;                    % v opacnem pripade
%end                                 % sniz o hodnotu 1
%end
%if(check==length(NA_v))           % jestlize vysledek scitani/odcitani v
%fprintf('Normovani je v poradku!') % promenne check odpovida delce vektoru NA
%table=[R_o maximum_o];           % je vse OK
%                                   % a vytvor souhrnou tabulku polomeru
%                                   % ohybu a prislusnych maximanich utlumu
%else                                % jinak
%fprintf('Chyba normovani!')      % je vypocet spatny
%break                             % a ukonci program
end
end

% -----
% -----
if(graf==5)

for(j=1:length(lambda_v))          % cyklus pro vypocet zavislosti na NA
R=R_start;                         % resetuje R na vychozi hodnotu po
                                   % skonzeni nasledujiciho cyklu
lambda=lambda_v(1,j);              % nastavi prislusnou numerickou aperturu
                                   % definovanou vektorem vyse
for(i=1:((R_stop-R_start)*10^3)/(step*10^3)+2) % upravuj 2 pokud chces rozsirit
                                   % polomer ohybu, cyklus pro vypocet
                                   % zvaislosti utlumu na polomeru ohybu

n1=1.4504;                          % index lomu jadra
n2=sqrt(n1.^2-NA.^2);

if(n2<n1)                            % podminka pro vedeni vlny
zeta=(1:precise:200).*1e4;           % transformovana souradnice 'y' ve FT
pr=7;                                % velikost ronbergovi tabulky (zvys, dokud se
hodnoty posledni a predposledni nebudou rovnat)

[~,~,loss,~,~,~,~,~]=ref7(R,lambda,zeta,pr,n2); % vypocet vysledneho utlumu
ohybem pro prislusne parametry
losss(j,i)=abs(loss);                % vektor ztrat (pro jednotlivy vlnove delky)

else
    fprintf('Spatne nastavene indexy lomu!')
    break                             % prerus vypocet nepltati-li podminka n2<n1
end
end
Rv(j,i)=R;                          % vektor polomeru
R=R+step;                            % nasledujici polomer

end
[maximum_o(j,:) pointer_o(j,:)] = max(losss(j,:)); % urceni maxima a jeho ukazatele
pro jednotlivy faze simulace (tj. pro kazdou sadu hodnot prislusne NA)
R_o(j,:)=(Rv(j,pointer_o(j,:)).*1e3; % urceni polomeru ohybu pro maximalni
utlum
end

```

```

% vykresleni normovaneho grafu pro volbu graf==5
close all
check=0; % pomocna kontrolni promenna zda je normovani
          % provedeno korektne

%for(kk=1:length(lambda_v))
%losss(kk,:)=losss(kk,:)/maximum_o(kk,:); % normovani maximalni hodnotou
%[maximum_n(kk,:) pointer_n(kk,:)] = max(losss(kk,:)); % kontrola zda odpovidaji
          % ukazatele, tedy zda bylo normovani
          % provedeno pro spravne hodnoty

%end

for(kk=1:length(lambda_v))
figure(1) % zavislost utlumu na polomeru ohybu R, s
          % parametrem lambda

hold on
col=jet(length(lambda_v));
plot(Rv(kk,:).*10^3,losss(kk,:), 'color',col(kk,:), 'LineStyle','--')
grid on
xlabel('R [mm]')
ylabel('Loss [ dB/m ]')
legend(['\lambda= ' num2str(lambda_v(1,1)*10^9), ' nm'], ['\lambda= '
num2str(lambda_v(1,2)*10^9), ' nm'], ['\lambda= ' num2str(lambda_v(1,3)*10^9), '
nm'], ['\lambda= ' num2str(lambda_v(1,4)*10^9), ' nm'], ['\lambda= '
num2str(lambda_v(1,5)*10^9), ' nm'])
title(['Zavislost utlumu na polomeru R, kde parametrem je vlnova delka \lambda, NA=
0.128'])
end
end

```

## Příloha 5: Jádro výpočtu, řešení integrálu (23)

```
function [alfa_x2,vysledek_p,Loss]=ref7(R,lambda,limit_integrace,pr,n2)
%[alfa_x2]=ref7(R,lambda);
%Vypocet 2*alfa ohnutého vlákna typu SMF-28 podle [7]:
%Faustini, L., Martini, G.: Bend Loss in Single-Mode Fibers. IEEE Journal
%of Lighthwave technology, vol. 15, no. 4, Apr. 1997, pp. 671-679.

%Definovani velicin
a=4e-6; b=62.5e-6; c=125e-6; %nevyuzito (polomer 1.ochranné vrstvy)
n1=1.4504; %n2=1.4447;
n3=1.4786;

%Konstanty sireni
k0=2*pi./lambda; k1=k0.*n1; k2=k0.*n2; k3=k0.*n3;

%!! Pri integraci je zeta vektor => vsechny funkce vraceji take vektor !!
% R_ je aktualne zpracovavana hodnota (vektoru) R.
% Funkce jsou vnorene (nested) a prebiraji hodnoty k0, k1, k2, beta atd.

%Definovani X2,3(x,zeta) (vztah 2.1)
function [vysl]= X2(x,zeta)
    vysl=(R_./2./k2^2).^2/3*(beta.^2+zeta.^2-k2.^2*(1+2.*x./R_));
end

function [vysl]= X3(x,zeta)
    vysl=(R_./2./k3^2).^2/3*(beta.^2+zeta.^2-k3.^2*(1+2.*x./R_));
end

%Definovani chi2,3 (zeta) (vztah 13.1)
%chi_q je vlastne jen hranata zavorka z X_q pro x=b
function [vysl]=chi2(zeta)
    vysl=-beta.^2-zeta.^2+k2.^2*(1+2.*b./R_);
end
function [vysl]=chi3(zeta)
    vysl=-beta.^2-zeta.^2+k3.^2*(1+2.*b./R_);
end

%Definovani theta (zeta) (vztah 13.2)
%exponent 3/2 kompenzuje 2/3 z X_q
function [vysl]=theta(zeta)
    vysl=2/3.*R_./2./k2.^2*(-beta.^2-zeta.^2+k2.^2*(1+2.*b./R_)).^(3/2)+pi()/4;
end

%Integrand ve vztahu (14), pro prehlednost je rozlozen na 3 soucinitele
function [vysl]=integrand(zeta)
    pomocne=sqrt(gamma.^2+zeta.^2);
    cinitel1=exp(-a.*pomocne)./pomocne;
    cinitel2=airy(0,X2(0,zeta))./airy(2,X2(a,zeta));
    cinitel3=sqrt(chi2(zeta).*chi3(zeta))./
    (chi2(zeta).*cos(theta(zeta)).^2+chi3(zeta).*sin(theta(zeta)).^2);
    vysl=cinitel1.*cinitel2.*cinitel3;
end

% Zdefinovani disperzni rovnice
function [u,v,norm_beta]=disper_LP01(V)
```



```

f=inline('abs((besselj(0,u))/(u.*besselj(1,u))-(besselk(0,sqrt(V.^2-u.^2)))/(sqrt(V.^2-
u.^2)*besselk(1,sqrt(V.^2-u.^2))))','u','V'); %definice disperzni rovnice --> dostaneme
fci f(u,v)
u=fminbnd(@(u)f(u,V),0,V); % vypocet v (znam-li u) na intervalu <0,V>
v=sqrt(V.^2-u.^2);
zkouska=inline('abs((besselj(0,u))/(u.*besselj(1,u))-(besselk(0,v))/
(v.*besselk(1,v))))','u','v'); %definice disperzni rovnice --> dostaneme fci f(u,v)
fprintf('Chyba reseni disperzni rovnice: %i.\n', zkouska(u,v))
norm_beta=(v./V)^2;
end
% *****
% * Hlavni vypocet *
% *****
% Nasledujci hodnoty jsou behem integrace pevne
NA=sqrt(n1^2-n2^2); %numericka apertura
V=2*pi()*a./lambda*NA; %norm. frekvence, neplest s 'v'
for (i=1:length(lambda))
[u(1,i),v(1,i),norm_beta(1,i)]=disper_LP01(V(1,i)); %pro LP01 nalezne z disperzni
rovnice u,v a normovane beta
end
nef=sqrt(norm_beta*NA^2+n2^2); %ef. index lomu
beta=k0.*nef;
kappa=sqrt(k1.^2-beta.^2); %take rovno u/a
gamma=sqrt(beta.^2-k2.^2); %take rovno v/a

%kontrolni vypis, normalne neni treba
% clc
fprintf('SMF-28, ciselne vysledky\n')
fprintf('lambda= %4.0f\n ',lambda*1e9)
fprintf('a= %4.0f\t b=%4.0f\t c=%4.0f\n',a*1e6,b*1e6,c*1e6)
fprintf('V= %4.2f\n',V)
fprintf('NA= %5.3f\n',NA)
fprintf('b= %5.2f\t u=%5.2f\t v=%5.2f\n',norm_beta,u,v)
fprintf('n1= %5.3f\t n2=%5.3f\t nef= %5.3f\n',n1,n2,nef)
fprintf('k0= %5.2e\t k1= %5.2e\t beta= %5.2e\t kappa= %5.2e\t gamma=
%5.2e\n',k0,k1,beta,kappa,gamma)

%cyklus pres vechny prvky (vektoru) polomeru R
for prvek=1:max(size(R))
R_=R(prvek); %aktualne zpracovavany polomer, na nem
zavisi vsechny funkce
%integral=quad(@integrand,0,limit_integrace*gamma); %namisto nekonecna je
horni mez=1*gamma, pro 10*gamma jiz hlasi problemy
for (i=1:length(lambda))
integral=romberg(@integrand,0,limit_integrace.*gamma,pr); %rombergovo metoda
integrovani
end
vysledek=2*kappa.^2./beta./V.^2./besselk(1,v).^2.*integral; %vztah (14)
vysledek_p=vysledek(pr,pr-1); %kontrola posledni a predposledni hodnoty
rombergovy tabulky
vysledek=vysledek(pr,pr); %pri rombergove integrace vybere posledni
%clen tabulky

koef=20*log10(exp(1)); %prepocet Np/m na dB/m
fprintf('Pro R= %4.1f mm je 2*alfa= %5.2f Np/m, tj. %5.2f
dB/m\n',R_*1e3,vysledek,vysledek*koef);
alfa_x2(prvek)=vysledek;
%Loss(1,prvek)=vysledek.*koef; %odkomentuj pro srovnani
Loss=vysledek.*koef;%odkomentuj pro main
end
end

```

end %funkce ref7

## Příloha 6: Řešení disperzní rovnice

nalezne  $u$ ,  $v$  pro SMF, řeší rovnici (12)

```
clc;
clear all;
close all;

step=0.1;
Vstart=1;
Vstop=7;
Vv1=Vstart;
for (i=1:(Vstop-Vstart)/step)+1)
fLP01=inline('abs((besselj(0,u))/(u*besselj(1,u))-(besselk(0,sqrt(Vv^2-u^2)))/
(sqrt(Vv^2-u^2)*besselk(1,sqrt(Vv^2-u^2))))','u','Vv'); %definice disperzni rovnice -->
dostaneme fci f(u,v)
fLP11=inline('abs((besselj(1,u))/(u*besselj(2,u))-(besselk(1,sqrt(Vv^2-u^2)))/
(sqrt(Vv^2-u^2)*besselk(2,sqrt(Vv^2-u^2))))','u','Vv');
fLP21=inline('abs((besselj(2,u))/(u*besselj(3,u))-(besselk(2,sqrt(Vv^2-u^2)))/
(sqrt(Vv^2-u^2)*besselk(3,sqrt(Vv^2-u^2))))','u','Vv');
fLP02=inline('abs((besselj(3,u))/(u*besselj(4,u))-(besselk(3,sqrt(Vv^2-u^2)))/
(sqrt(Vv^2-u^2)*besselk(4,sqrt(Vv^2-u^2))))','u','Vv');

u1=fminbnd(@(u)fLP01(u,Vv1),0,Vv1); % vypocet v (znam-li u) na intervalu <0,V>
u2=fminbnd(@(u)fLP11(u,Vv1),0,Vv1); % vypocet v (znam-li u) na intervalu <0,V>
u3=fminbnd(@(u)fLP21(u,Vv1),0,Vv1); % vypocet v (znam-li u) na intervalu <0,V>
u4=fminbnd(@(u)fLP02(u,Vv1),0,Vv1); % vypocet v (znam-li u) na intervalu <0,V>

v1=sqrt(Vv1^2-u1^2);
v2=sqrt(Vv1^2-u2^2);
v3=sqrt(Vv1^2-u3^2);
v4=sqrt(Vv1^2-u4^2);

zkouska=inline('abs((besselj(0,u))/(u*besselj(1,u))-(besselk(0,v))/
(v*besselk(1,v))))','u','v'); %definice disperzni rovnice --> dostaneme fci f(u,v)
norm_beta1=(v1/Vv1)^2;
norm_beta2=(v2/Vv1)^2;
norm_beta3=(v3/Vv1)^2;
norm_beta4=(v4/Vv1)^2;
bbb1(1,i)=norm_beta1;
bbb2(1,i)=norm_beta2;
bbb3(1,i)=norm_beta3;
bbb4(1,i)=norm_beta4;

tst(1,i)=zkouska(u1,v1);
V1(1,i)=Vv1;
Vv1=Vv1+step;
end
figure(1)
plot(V1,bbb1,'black')
hold on;
plot(V1((14:(Vstop-Vstart)/step)+1),bbb2((14:(Vstop-Vstart)/step)+1),'black--')
grid on
plot(V1((28:(Vstop-Vstart)/step)+1),bbb3((28:(Vstop-Vstart)/step)+1),'black-.')
%hold on;
%plot(V1((3:(Vstop-Vstart)/step)+1),bbb4((3:(Vstop-Vstart)/step)+1),'black.')
title('Disperzni rovnice vlakna se "slabym" vedenim')
```

```
xlabel('V [-]')  
ylabel('b [-]')  
legend('LP01','LP11','LP21')
```

## Příloha 7: Rombergova integrační metoda

```
%Algoritmus převzat z : Vysoka skola banska-  
%Technicka univerzita Ostrava, Fakulta stavebni  
% Prednaska z predmetu: Algoritmizace inzenyrskych vypoctu  
%Tema c. 6: Numericka integrace urciteho integralu  
%http://fast10.vsb.cz/krejsa/studium/algoritmy\_06.pdf  
%<cit. 31.1.2016>  
function [integral]=romberg(f,a,b,n)  
h=(b-a)/(2^(0:n-1));  
integral(1,1)=(b-a)*(f(a)+f(b))/2;  
for j=2:n  
s=0;  
for i=1:2^(j-2)  
s=s+f(a+(2*i-1)*h(j));  
end  
integral(j,1)=(integral(j-1,1)+h(j)*s);  
for k=2:j  
integral(j,k)=(4^(k-1)*integral(j,k-1)-integral(j-1,k-1))/(4^(k-1)-1);  
end  
end  
end
```

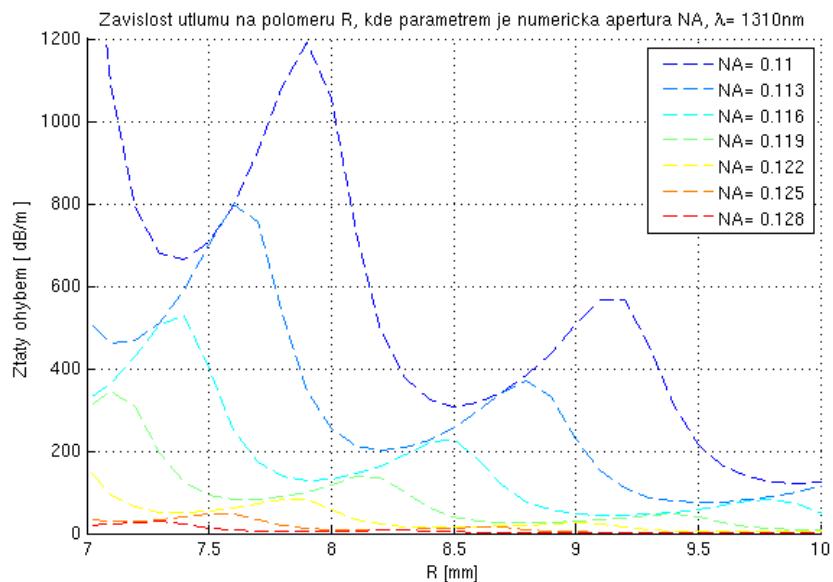
## Příloha 8: Zpracování směrové charakteristiky vyzařování závitu

```
close all;
clear all;
clc
y=[0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320 340 360];
x=[-50 -40 -30 -20 -10 0 10 20 30 40 50 ];
z=readtable('data.xls','ReadVariableNames',false);
z=table2array(z);
mz=max(max(z));
z=((z/mz)-1)*(-1);

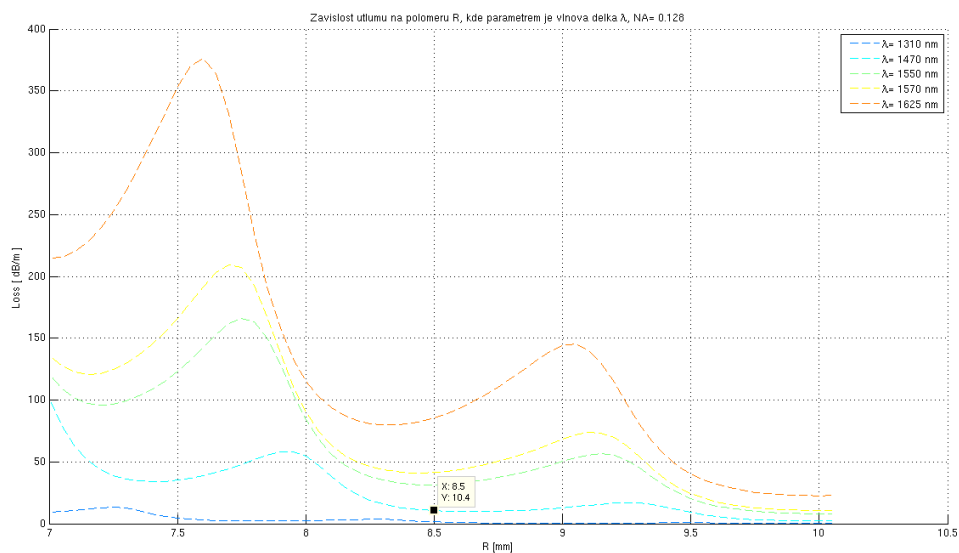
figure(1)
surf(x, y, z)
colorbar
xlabel('Elevace [ \circ ]')
ylabel('Azimut [ \circ ]')
ylabel(colorbar,'Relativni vyzareny vykon [-]')
zlabel('Relativni vyzareny vykon [ - ]')
title('Smerova charakteristika jednoho zavitu optickeho vlakna SMF-28')
```

% azimut  
% elevace  
% nacte tabulku ze  
souboru data.xls  
% prevede tabulku na  
pole  
% najde maximum  
% znormuje na 0 v  
maximu

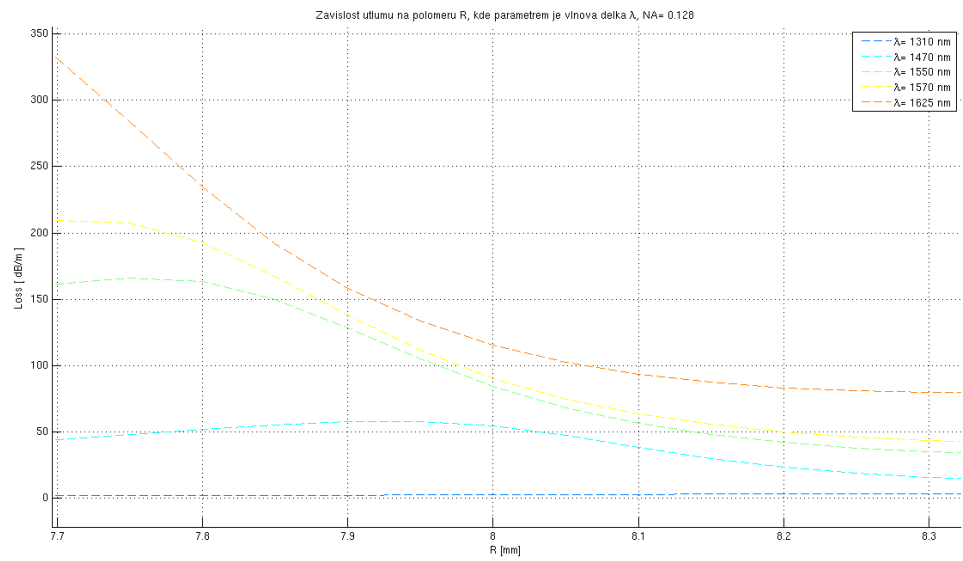
## Příloha 9: Další simulace vlákna SMF-28 s ochranou 250 $\mu\text{m}$



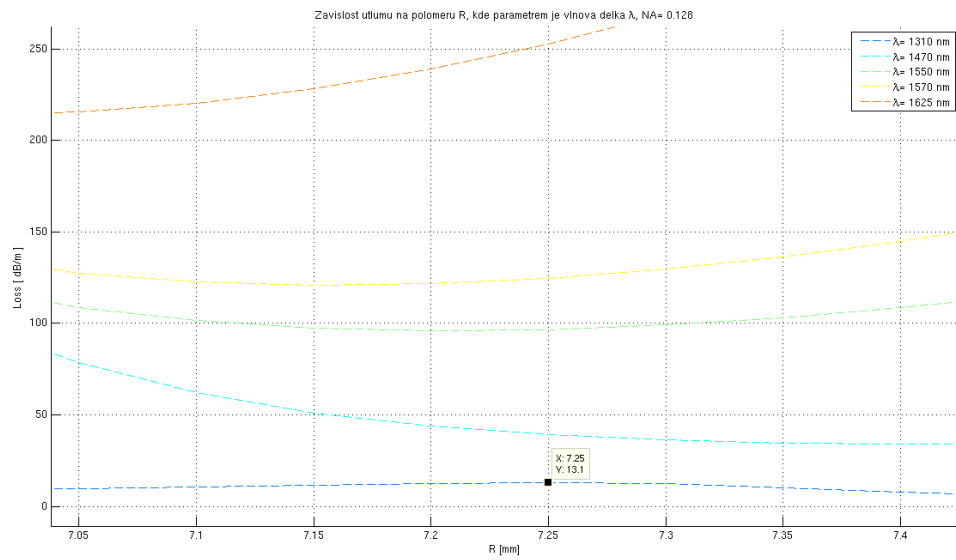
Obr. 1. Závislost útlumu na poloměru ohybu, kde parametrem je numerická apertura



Obr. 2. Závislost útlumu na poloměru ohybu, kde parametrem je vlnová délka

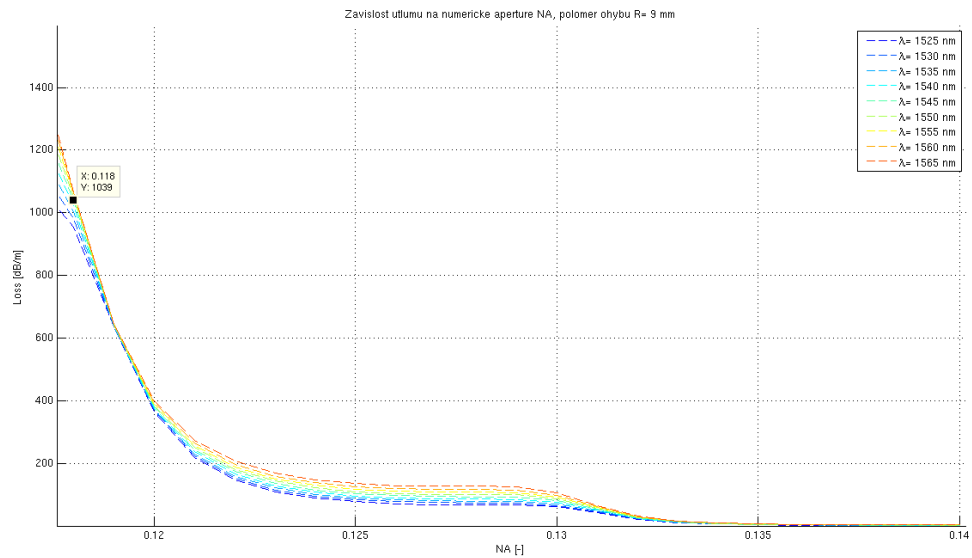


Obr. 3. Závislost útlumu na poloměru ohybu, kde parametrem je vlnová délka, detailnější náhled pro  $R \in \langle 7,7; 8,3 \rangle$

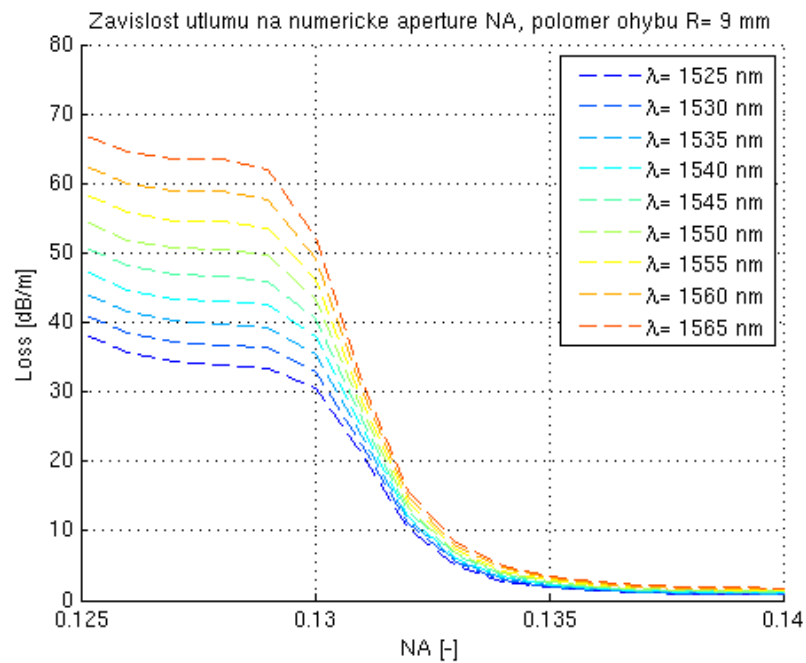


Obr. 4. Závislost útlumu na poloměru ohybu, kde parametrem je vlnová délka, detailnější náhled pro  $R \in \langle 7,05; 7,45 \rangle$



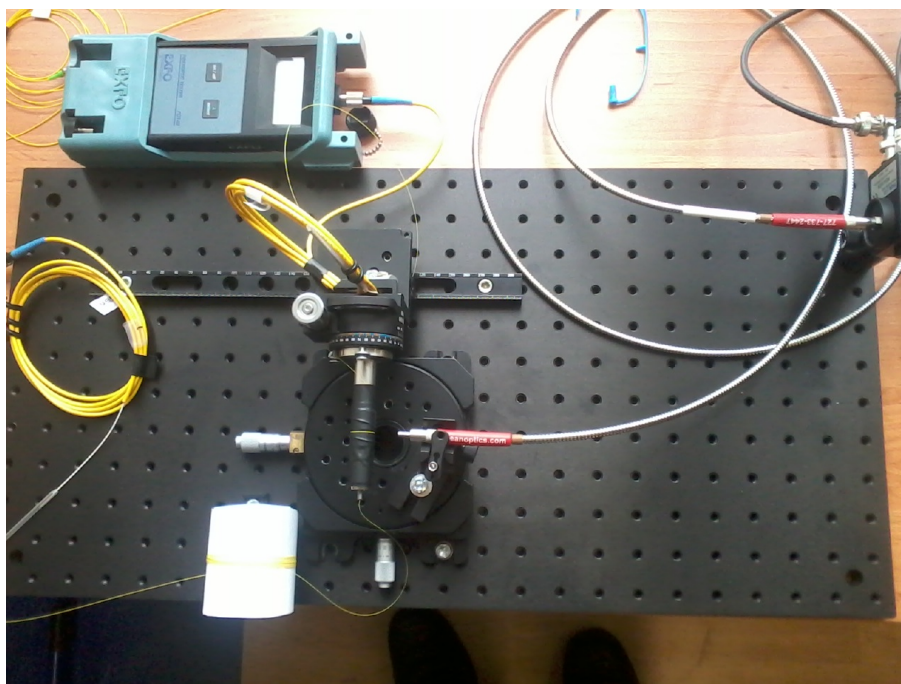


Obr. 5. Závislost útlumu na numerické apertuře, kde parametrem je vlnová délka, detailnější náhled pro  $NA \in \langle 0,175; 0,140 \rangle$

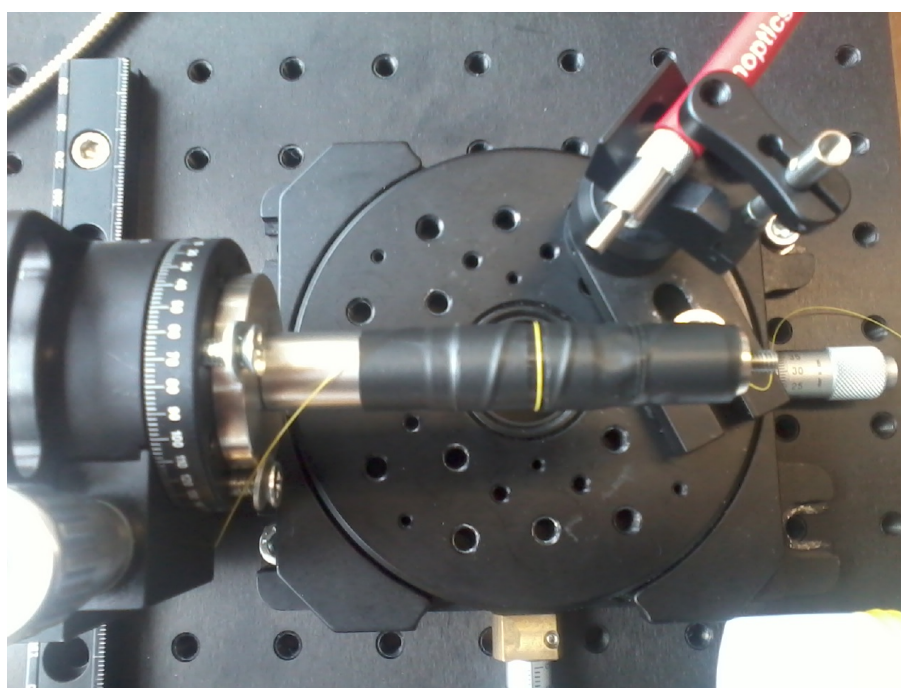


Obr. 6. Závislost útlumu na numerické apertuře, kde parametrem je vlnová délka, detailnější náhled pro  $NA \in \langle 0,125; 0,140 \rangle$

## Příloha 10: Fotodokumentace



Obr. 1. Měření směrové charakteristiky závitů – celkový náhled



Obr. 2. Měření směrové charakteristiky závitů – detailní náhled závitů

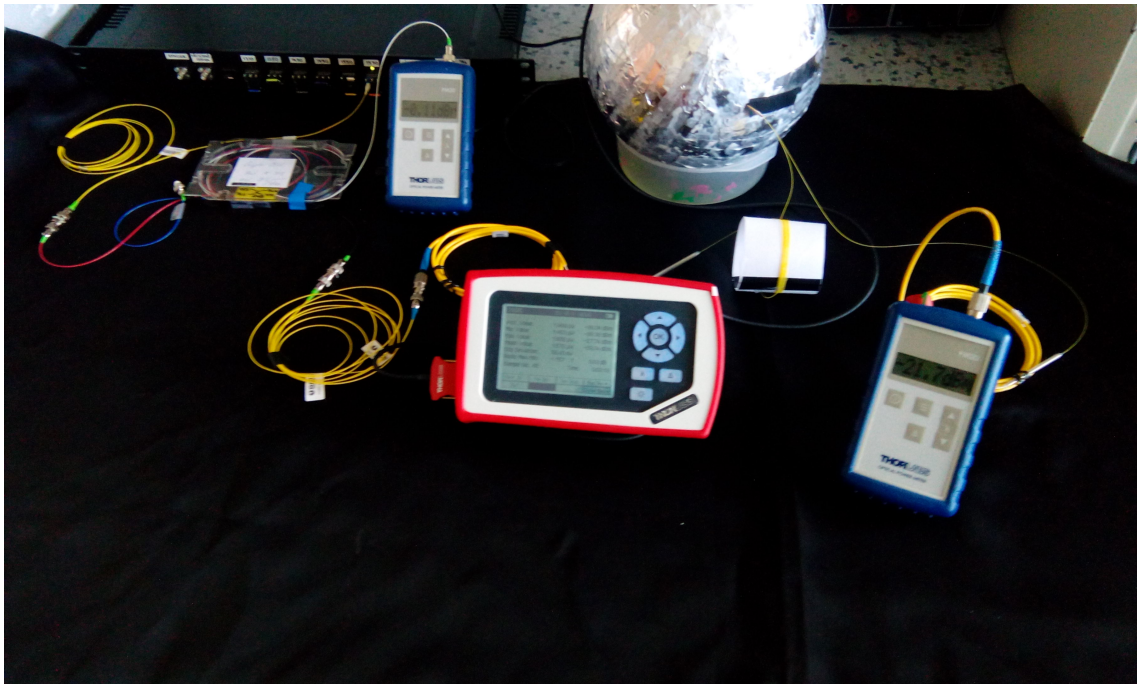


Obr. 3. První orientační měření vlastností polystyrénových integračních koulí

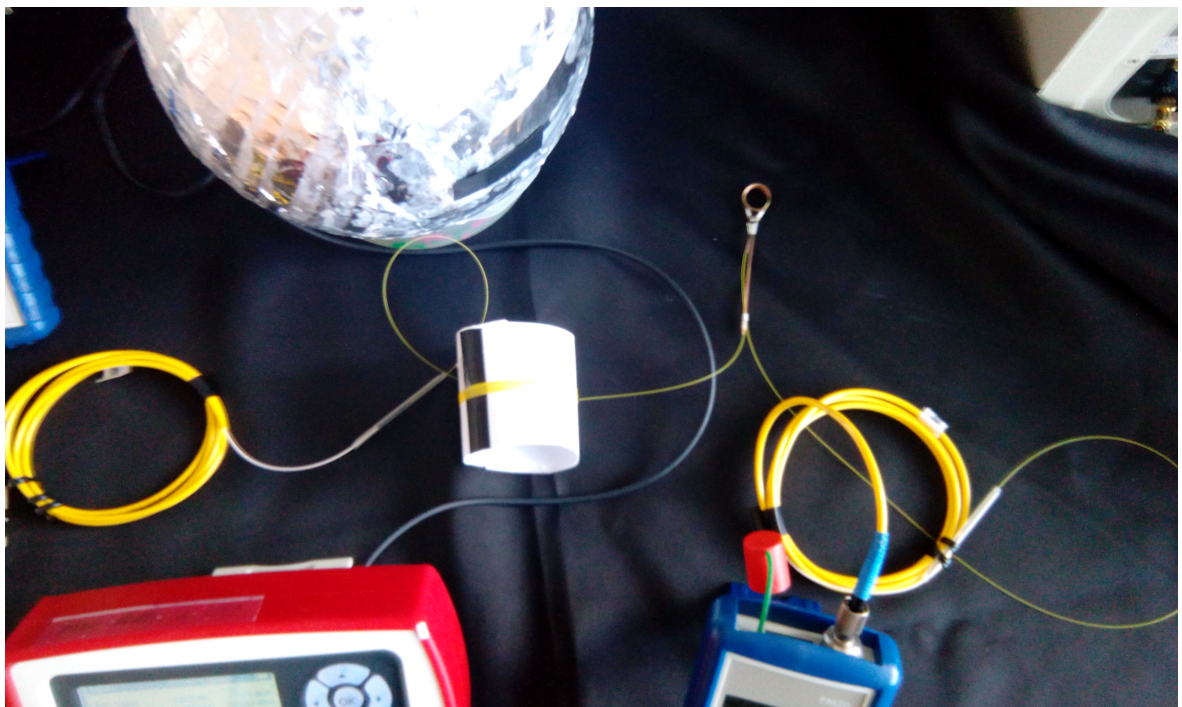


Obr. 4. Rozebraná integrační koule



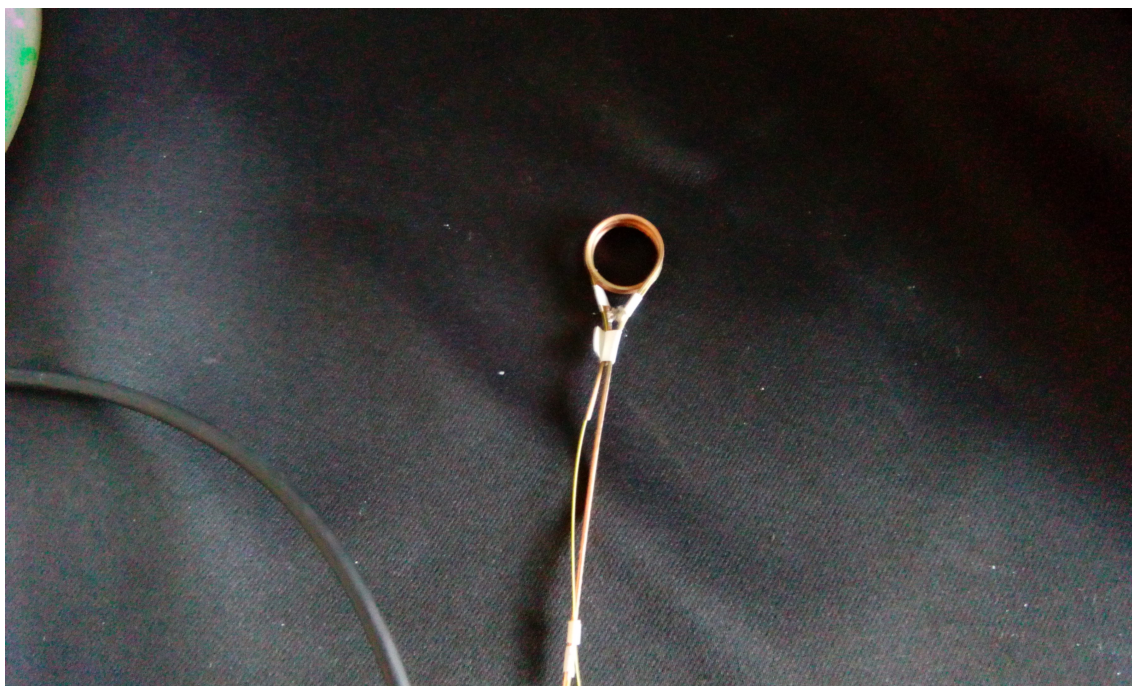


Obr. 5. Měření navrženou aparaturou



Obr. 6. Měření navrženou aparaturou – pohled na testovaný úsek vlákna SMF-28 s ochranou 200  $\mu\text{m}$





Obr. 7. Měření navrženou aparaturou – detailní pohled na smyčku navinutou na V-drážku



Obr. 8. Navržené integrační koule s detektorem Thorlabs S122C

## **Příloha 11: Seznam použitého Software**

Kancelářský balík LibreOffice (GNU GPL)

Balík pro analýzu a vědeckou vizualizaci dat QtiPlot (GNU GPL)

Manažer referencí Mendeley (GNU GPL)

Vektorový grafický editor Inkscape (GNU GPL)

Vektorový editor Zoner Calisto 5 (freeware)

Nástroj pro numerické řešení Octave (GNU GPL)

Nástroj pro numerické řešení Matlab

Nástroj pro práci s pdf Okular (GNU GPL)

Nástroj pro práci s rastrovou grafikou Gimp (GNU GPL)