

INTERFERENCIA VIDOV AKO ZDROJ INFORMÁCIÍ O OPTICKÝCH VLÁKNACH INTERMODAL INTERFERENCE AS A SOURCE OF INFORMATION ON OPTICAL FIBRES

Daniel Káčik¹, Ivan Turek², Ivan Martinček², Drahomír Grendár¹

¹Katedra komunikácií, ²Katedra fyziky, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita, Veľký diel, 01026, Žilina

Abstrakt: V práci je uvedený principiálny popis interferencie vidov v optických vláknach, z ktorého vyplývajú možnosti jej sledovania v spektrálnej a dĺžkovej (priestorovej) oblasti. Sú stručne popísané zariadenia použité pre takéto vyšetovanie a sú uvedené ilustrácie dosiahnutých výsledkov. V závere sa poukazuje na rozmanité možnosti využitia interferencie vidov pre zisťovanie informácií o profile indexu lomu vyšetovaného vlákna.

Summary: A basic description of intermodal interference which follows possibility investigation of intermodal interference in spectral and space region. There is also a brief description of equipments used for such investigation and some illustrations of obtained results. There is pointed in the latest paragraphs on different possibilities how the intermodal interference investigation can give some information about refractive index profile in the investigated fibre.

1. ÚVOD

V literatúre sa s pojmom interferencia vidov v optických vláknach najčastejšie stretávame v spojení so senzorovými aplikáciami. Takéto senzory obyčajne využívajú zmenu fázových konštánt vidov, ktoré sa menia so zmenami geometrických a materiálových parametrov optických vlákien [1,2]. Takisto sa môžeme stretnúť s využitím interferencie vidov pre konštrukciu spektrálnych filtrov. V predchádzajúcich prácach sme ukázali, že interferenciu vidov možno použiť i pre kontrolu geometrických a prenosových parametrov optických vlákien [3,4]. Napriek tomu, že sa v poslednej dobe vyvinuli rozmanité kontrolné postupy vychádzajúce z dobre rozvinutej báze zariadení OTDR [5], domnievame sa, že metódy vychádzajúce z interferencie vidov môžu nájsť svoje uplatnenie pri kontrole vlákien a tejto problematike je venovaný i predkladaný článok.

2. POPIS INTERFERENCIE

Pri vlnových dĺžkach menších ako hraničná vlnová dĺžka λ_c sa vláknom môže šíriť viac vidov [10]. Ako je dobre známe, rôzne vidy sa v optickom vlákne šíria rôznymi rýchlosťami (inak povedané majú rôzne konštanty šírenia). Tento rozdiel vedie ku špeciálnemu efektu tzv. interferencii vidov, ktorú môžeme vyšetovať, ak sú splnené určité podmienky, ktoré vyplývajú z nasledujúceho popisu.

V kruhovo symetrických vláknach sa polarizácia svetla neprejaví na vlastnostiach vidov, takže rozloženie optického poľa na konci vlákna, ktorým sa šíria dva vidy, môžeme vyjadriť

$$u(x, y, z, t) = a_1 \psi_1(x, y) \exp[j(\omega t + \beta_1 z)] + a_2 \psi_2(x, y) \exp[j(\omega t + \beta_2 z)] \quad (1)$$

kde a_1, a_2 sú amplitúdy interferujúcich vidov, ψ_1 a ψ_2 sú funkcie vyjadrujúce rozloženie poľa príslušných vidov, x, y, z sú súradnice, t je čas, ω je uhlová frekvencia svetelnej vlny a β_1 a β_2 sú fázové konštanty uvažovaných vidov.

Ak rozdiel medzi grupovými rýchlosťami interferujúcich vidov je tak malý, že oneskorenie jedného vidu voči druhému je menšie ako doba koherencie zdroja svetla, potom signál vytvorený detektorom môžeme napísať

$$s = \int_S c(x, y) u(x, z, y, t) \cdot u^*(x, z, y, t) dS, \quad (2)$$

kde c je citlivosť detektora a S je jeho plocha. Ak citlivosť detektora c nezávisí na súradniciach, po roznásobení a úpravách vzťahu (2) dostávame

$$s = s_1 + s_2, \quad (3)$$

kde

$$s_1 = c \int_S [a_1^2 \psi_1^2(x, y) + a_2^2 \psi_2^2(x, y)] dx dy \quad (4)$$

a

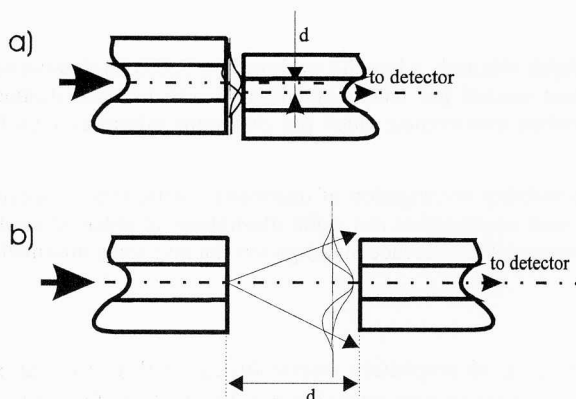
$$s_2 = 2c \int_S [a_1 a_2 \psi_1(x, y) \psi_2(x, y)] dx dy \cos\left(\frac{\omega z}{v_1} - \frac{\omega z}{v_2}\right) \quad (5)$$

kde v_1 a v_2 sú fázové rýchlosti uvažovaných vidov. Ako vidieť zo vzťahu (4), prvý člen vo vyjadrení intenzity signálu podľa (3) je súčtom kvadratických členov a jeho hodnota nezávisí od fázových konštánt jednotlivých vidov, zatiaľ čo druhý člen tohto vzťahu podľa (5) závisí nielen od amplitúd, ale aj od fázy interferujúcich vidov.

Ak sú ψ_1 a ψ_2 ortogonálne (t.j. skalárny súčin funkcií je rovný nule) a citlivosť detektora c nezávisí od súradníc, hodnota druhého člena rovnice (3) je rovná nule. Aby bolo možné pozorovať interferenciu vidov, je potrebné narušiť ortogonalitu funkcií popisujúcich detekované interferujúce

pole. Dá sa to dosiahnuť rôznymi spôsobmi, napríklad použitím detektora s citlivosťou závislou od polohy, ovplyvnením poľa vhodnou diafragmou, alebo sa optické pole na konci vyšetřovaného vlákna sníma ďalším tzv. detekčným vláknom.

Na nasledujúcom obrázku je znázornený spôsob „narušenia“ ortogonalít funkcií použitý v našich meraniach v prípade vyšetřovania interferencie vidov LP_{01} , LP_{11} a LP_{02} .



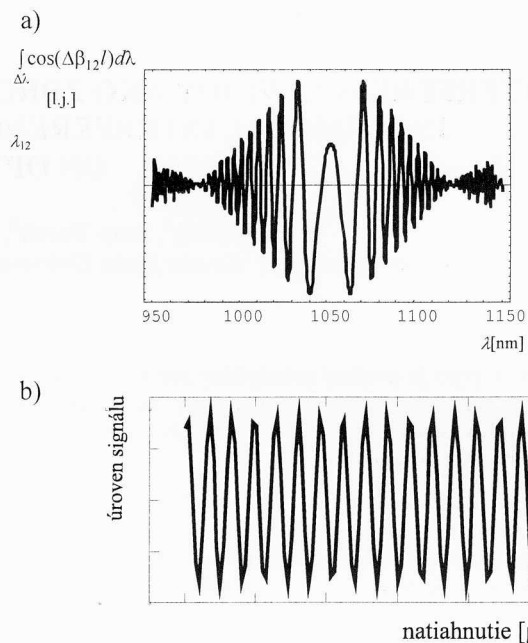
Obr.1. Vzájomná poloha vyšetřovaného a detekčného vlákna pre sledovanie interferencie. a) LP_{01} - LP_{11} , a b) LP_{21} - LP_{02} dvojice vidov.

Fig.1. Relative displacement of investigated and detecting fibres at investigation intermodal interference a) LP_{01} , LP_{11} , and b) LP_{21} a LP_{02} modes.

Zo vzťahu (5) vyplýva, že pri porušení ortogonalít vidov môžeme pri konštantnej vlnovej dĺžke pozorovať periodickú (harmonickú) závislosť interferenčného členu s_2 a teda i výsledného signálu od dĺžky vlákna (interferencia v dĺžkovej oblasti). Pri konštantnej dĺžke vlákna z tohto vzťahu vyplýva kváziperiodická závislosť signálu od vlnovej dĺžky (interferencia vo frekvenčnej oblasti), tak ako to je zobrazené na obr.2.a a 2.b.

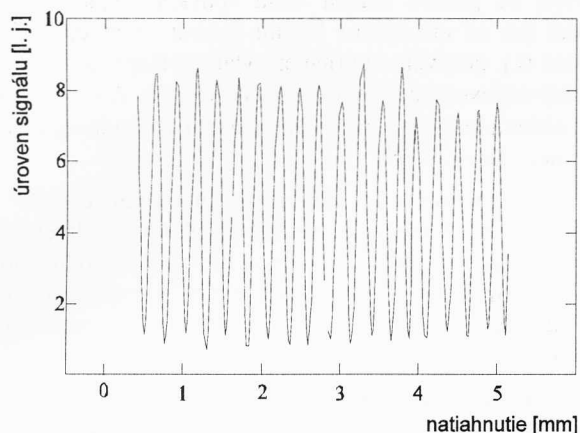
3. EXPERIMENTÁLNE VYŠETRENIE INTERFERENCIE V DĹŽKOVEJ OBLASTI

Zariadenie použité na vyšetřovanie interferencie vidov v dĺžkovej oblasti pozostáva z He-Ne lasera pracujúceho na vlnovej dĺžke 633 nm, z pohyblivého stolíka s elektronickou registráciou jeho posunutia pomocou merača výchyliek EDK 93 a 3D mikroposuvného stolíka poskytujúceho nastavenie polohy vyšetřovaného a detekčného vlákna, prostredníctvom ktorého sa realizovala voľba interferujúcich vidov (obr.1.)



Obr.2. Charakter signálu pri sledovaní interferencie a) v spektrálnej oblasti, b) v dĺžkovej oblasti. Fig.2. Signal character of intermodal interference in a) spectral and b) space region

Vlákná použité v experimente boli konvenčné optické telekomunikačné vlákna, dĺžky približne 100 cm. Časť vyšetřovaného vlákna bola zbavená primárnej ochrany a v tomto mieste bolo vlákno prichytené na pevnú kovovú tyčku. Ďalšia časť vlákna bez primárnej ochrany bola prilepená na pohyblivom stolíku. He-Ne laser bol použitý ako zdroj svetla. Na vlnovej dĺžke 633 nm je vlákno štvorvidové (širia sa vidy LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} a LP_{02} .) Z týchto vidov len LP_{01} a LP_{02} sú kruhovo symetrické a preto môžu byť súčasne vybudené, ak naväzované svetlo je fokusované na stred jadra vlákna pomocou šošovky. Nakoľko sa nedá úplne zamedziť vybudeniu nesymetrických vidov, signál z konca vyšetřovaného vlákna sa sníma detekčným vláknom pomocou ktorého narušíme ortogonalitu vidov LP_{01} a LP_{02} (obr.1b). Vyšetřované vlákno sa pri meraní naťahuje pomocou posuvného stolíka. Pri zmene dĺžky vyšetřovanej časti vlákna sa mení fázový rozdiel medzi šíriacimi sa vidmi, čo vedie k harmonickej závislosti signálu od dĺžky vlákna (obr.3.). Priebehy namerané pri rôznych vláknach sa líšia amplitúdou a počtom extrémov pripadajúcich na celkovú dĺžku. Veľkosť amplitúdy nie je dôležitá pri určovaní záznejovej dĺžky interferencie vidov, pretože závisí len od vybudenia jednotlivých vidov, od vzdialenosti čiel vyšetřovaného a detekčného vlákna. Počet extrémov však priamo súvisí s veľkosťou záznejovej dĺžky. Z nameraných závislostí boli odčítané záznejové dĺžky pre jednotlivé optické vlákna.



Obr. 3. Ilustrácia nameranej závislosti amplitúdy signálu od predĺženia optického vlákna.

Fig. 3. Dependence of the measured signal amplitude on an extension of the fibre.

Tak ako je vidieť z tab.1, záznejová dĺžka interferencie vidov LP_{01} a LP_{02} pre jednotlivé vlákna nie je rovnaká, čo principiálne umožňuje takéto vyšetrenie použiť na testovanie vzoriek vlákien, pretože s natiahovaním vlákna sa teoreticky menia jeho parametre. Či zmena parametrov vyvolaná natiahnutím vlákna má pozorovateľný vplyv na jeho parametre bolo overené tým, že sme vyšetřili vlákna rôznych dĺžok (30 a 70 cm). Nezávislosť záznejovej dĺžky interferencie vidov od natiahnutia vlákna sa potvrdila tým, že nameraná záznejová dĺžka nezávisela od dĺžky vlákna.

Tab. 1. Záznejová dĺžka interferencie vidov LP_{01} a LP_{02}

Poradové číslo vlákna	Záznejová dĺžka v μm
1	314
2	295
3	285
4	309
5	274
6	322

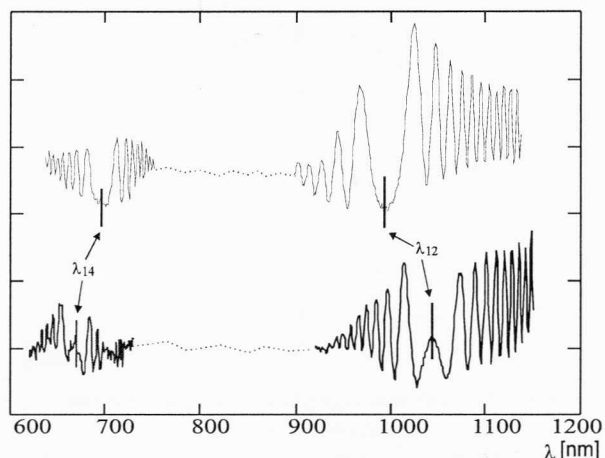
4. EXPERIMENTÁLNE VYŠETRENIE INTERFERENCIE VO FREKVENČNEJ OBLASTI

Experimentálne zariadenie použité na vyšetrenie interferencie vidov pozostáva z halogénovej žiarovky, monochromátora a 3D mikroposuvného stolíka.

Interferencia vidov bola vyšetřovaná na bežných konvenčných telekomunikačných vláknach s priemerom jadra $10 \mu\text{m}$ a s hraničnou vlnovou dĺžkou λ_c približne 1230 nm . Merania spektrálnej závislosti boli vykonané na

vláknach dĺžky 20 až 80 cm. V takto krátkych vláknach rozdiel medzi optickými dráhami vidov je menší ako koherenčná dĺžka svetla zdroja. Na druhej strane pri vyšetřovaní takto krátkych vlákien plášťové vidy môžu ovplyvniť celkové interferenčné pole. Aby sme zabránili tomuto efektu, bol použitý glycerínový sťahovač plášťových vidov.

Spektrálne závislosti získané popísanou metódou [3] sú dané na obr. 4



Obr. 4. Spektrálne závislosti signálu interferencie LP_{01} , LP_{11} , a LP_{21} a LP_{02} na dvoch rôznych vláknach.

Fig. 4. Spectral dependence of the signal at intermodal interference LP_{01} , LP_{11} , a LP_{21} a LP_{02} in twodifferent fibres.

Napriek tomu, že vyšetřované optické vlákna majú výrobcom zaručené rovnaké parametre, sú medzi nimi veľké rozdiely. Vyšetřovali sme rozdiel medzi vlnovými dĺžkami interferenčných stredov $\lambda_{1,2}$ (t.j. vlnových dĺžok kde zmena spektrálnej závislosti je najpomalšia). Hodnoty vlnových dĺžok interferenčných stredov prvého a druhého vidu sa líšili o viac ako 70 nm a interferenčné stredy prvého a štvrtého vidu sa líšili o viac ako 20 nm . Reprodukovateľnosť meraní bola asi 2 nm . Z toho vyplýva, že rozdiely mnohonásobne prevyšujú rozptyl našich meraní.

5. SIGNIFIKANTNÉ PARAMETRE POPISU INTERFERENCIE VIDOV A ICH SÚVIS S PROFILOM INDEXU LOMU

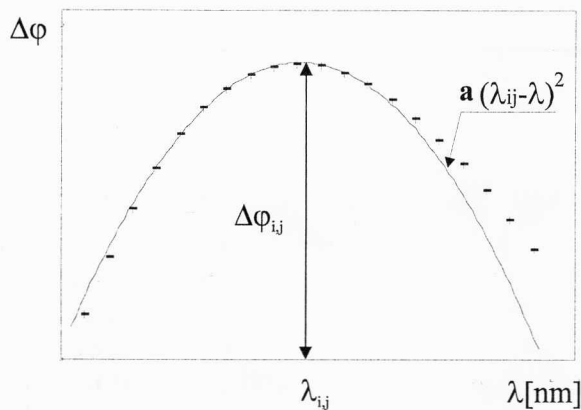
Spektrálnu a priestorovú závislosť hodnôt interferenčného člena možno charakterizovať viacerými parametrami. Tými najvýraznejšími charakteristikami sú (obr.5):

- Vlnové dĺžky stredov interferencie λ_{ij} . Sú to vlnové dĺžky, na ktorých pre rozdiel fázových konštánt $\Delta\beta = \beta_i - \beta_j$ interferujúcich vidov i a j platí $\partial(\Delta\beta) / \partial\lambda = 0$.
- Rozdiel fáz $\Delta\phi_{ij}$ pri vlnových dĺžkach rovných λ_{ij} . Medzividový fázový rozdiel $\Delta\phi_{ij}$ jednotlivých vidov i a j na konci vlákna dĺžky L pri vlnovej dĺžke λ je daný vzťahom

$$\Delta\varphi_{ij}(\lambda) = (\beta_i(\lambda) - \beta_j(\lambda)) L.$$

Tento parameter súvisí so záznejovou dĺžkou $l_{ij}(\lambda)$ interferujúcich vidov i a j na vlnovej dĺžke λ . Záznejovú dĺžku možno určiť z interferencie vidov v dĺžkovej oblasti.

- Parametre a_{ij} charakterizujúce strmosť maxima závislosti φ od λ



Obr. 5. Ilustrácia významných parametrov interferencie modov..

Fig. 5. Illustration of the significant parameters of intermodal interference.

Parameter λ_{ij} možno určiť priamym odčítaním z experimentálne nameraných spektrálnych závislostí prenosovej funkcie.

Z experimentálne nameraných spektrálnych závislostí je možné parameter a_{ij} určiť tak, že odčítame také hodnoty vlnových dĺžok λ , pre ktoré sa rozdiel fáz interferujúcich vidov $\Delta\varphi(\lambda)$ zmení o 2π (napr. polohy susedných maxim). Potom je možné zostrojiť grafickú závislosť $\Delta\varphi(\lambda)$. Takáto závislosť je v okolí hodnoty λ_{ij} parabolická s vrcholom paraboly na vlnovej dĺžke λ_{ij} a je možné popísať ju funkciou $a_{ij}(\lambda_{ij} - \lambda)^2$. Uvedli sme, že hodnoty $\Delta\varphi_{ij}$ možno stanoviť na základe nameranej záznejovej dĺžky pri meraní interferencie v dĺžkovej oblasti. Prísne povedané, premeraním záznejovej dĺžky pri rôznych vlnových dĺžkach sa dajú určiť všetky uvedené parametre. Nakoľko ale meranie spektrálnej závislosti signálu je experimentálne jednoduchšie, je výhodnejšie záznejovú dĺžku (pre každú dvojicu interferujúcich vidov) zmerať iba pri jednej vlnovej dĺžke a ostatné parametre určiť zo spektrálnej závislosti.

Pomocou vlnových dĺžok interferenčných stredov λ_{jk} a λ_{pq} pre interferujúce dvojice vidov j , k a p , q môžeme určiť pomer vlnových dĺžok interferenčných stredov

$$L_{jkpq} = \frac{\lambda_{jk}}{\lambda_{pq}}$$

L_{jkpq} je jeden z významných parametrov interferencie vidov.

Kým predchádzajúce parametre interferencie vidov závisia od profilu indexu lomu optického vlákna, L_{jkpq} závisí len od charakteru profilu indexu lomu optického vlákna (t.j. nezávisí od priemeru vlákna). Napr. pre vlákno so step-indexovým profilom indexu lomu je $L_{1214} = 1,468$ bez ohľadu na priemer jeho jadra, zatiaľ čo hodnoty λ_{jk} od priemeru jadra závisia.

Pomocou spomínaných parametrov interferencie vidov a pomocou interferenčných priebehov ako vo frekvenčnej tak i dĺžkovej oblasti môžeme za istých podmienok získavať informácie o geometrických i materiálových parametroch optických vlákien. V stručnosti spomenieme niekoľko príkladov:

Ak sa jedná o vlákno so step-indexovým profilom indexu lomu, tak môžeme numerickou simuláciou nameraného interferenčného obrazu určovať parametre n_{co} – maximálny index lomu v jadre optického vlákna, n_{cl} – minimálny index lomu v plášti optického vlákna a r – polomer jadra optického vlákna [3].

Ak profil indexu lomu optického vlákna môžeme popísať tzv. „ α profilom“ a poznáme polomer jadra optického vlákna a rozdiel indexu lomu medzi jadrom a plášťom optického vlákna, tak zo závislosti $\Delta\varphi_{ij}(\lambda)$ môžeme určiť parameter α [6].

Parameter α môžeme však určiť aj pomocou hodnoty L_{jkpq} bez ďalšieho poznania parametrov optického vlákna [7,8].

Ak poznáme charakter profilu indexu lomu a dva parametre z parametrov n_{co} , n_{cl} a r , tak pomocou λ_{jk} môžeme určiť tretí z týchto parametrov.

Ak poznáme pomer vlnových dĺžok interferenčných stredov prvého a druhého vidu a prvého a štvrtého vidu môžeme súdiť na charakter profilu indexu lomu [4]. Vlnová dĺžka interferenčného stredov výrazne závisí na polomere jadra optického vlákna a tiež na jeho numerickej apertúre [3]. Taktiež z pomeru fyzikálnej hraničnej vlnovej dĺžky λ_c a vlnovej dĺžky interferenčného stredov môžeme usudzovať na mikroohyby [9].

Na základe tohto môžeme povedať, že meranie interferencie vo frekvenčnej a v dĺžkovej oblasti je užitočné a doposiaľ nedocenený zdroj informácií o vlastnostiach optických vlákien.

6. ZÁVER.

Jednoduchosť merania interferencie vidov a dobrá zhoda medzi nameranými a vypočítanými hodnotami poukazuje na to, že vyšetrenie interferencie vidov môže byť užitočné pre kontrolu pri výrobe optických vlákien. Krivky uvedené na obr.3. a hodnoty uvedené v tab. 1 potvrdzujú rozdielnosť medzi jednotlivými vláknami a tým možnosť vyšetrenia vlákien práve pomocou merania interferencie vidov. To, že sledovanie interferencie vidov vykázalo rozdiely u komerčných vlákien so zaručenou rovnosťou prenosových parametrov poukazuje, že metóda môže byť citlivým indikátorom odlišností optických vlákien

Samozrejme, parametre vlákien sa nedajú zistiť len samotným meraním interferencie, pretože vlastnosti

interferenčného člena neovplyvňujú len jeden parameter. Avšak v kombinácii s inými meraniami dovoľuje získavať viac informácií o parametroch optických vlákien, než to dovoľujú štandardné diagnostické metódy.

LITERATÚRA

- [1] KUMAR, A. - GOEL, N. K. - VARSHNEY, R. K.: *Studies on a Few-Mode Fiber-Optic Strain Sensor Based on LP₀₁-LP₀₂ Mode Interference*, J. of Lightwave Technology, Vol.19, (2001), 358.
- [2] EFTIMOV, T. A. - BOCK, W. J.: *Sensing with a LP₀₁-LP₀₂ Intermodal Interferometer*, J. of Lightwave Technology, Vol.11, (1993), 2150-2156
- [3] TUREK, I. - MARTINČEK, I. - STRÁNSKY, R.: *Interference of modes in optical fibers*, Optical Engineering 39, (2000), 1304.
- [4] MARTINČEK, I. - GRONDŽÁK, K. - TUREK, I. - DADO, M. - PETERKA, P. - KÁČIK, D.: *Vplyv profilu indexu lomu na interferenciu módov v optických vláknach*, zborník konferencie Optické komunikácie 2000, Praha. str.133
- [5] JASENEK, J.: *The utilization of synthesized coherence function in optical time-domain reflectometry*, Journal of Electrical Engineering, 53, (2002), 30.
- [6] POSEY, R. - PHILLIPS, L. - DIGGS, D. - SHARMA, A.: *LP₀₁-LP₀₂ interference using a spectrally extended light source: measurement of the non-step-index profile of optical fibers*, Opt. Lett., vol.21, (1996), 1357-1359.
- [7] HLUBINA, P.: *Spektrální závislosti parametrů šíření dvojice vidů optického vlákna určené měřením vyrovnávací vlnové délky a mezividové disperze*, Jemná mechanika a optika, 3/99, 83-87.
- [8] MARTINČEK, I.: *Vyšetrovanie geometrických parametrov step-indexových telekomunikačných optických vlákien pomocou interferencie vidov*, Doktorská dizertačná práca, Žilinská univerzita, Žilina, 2001.
- [9] TUREK, I. - KÁČIK, D. - ČERNICKÝ, S.: *Bending dependence of cut-off wavelength of optical fibres and their transfer function* *Jemná mechanika a optika*, 7-8/2001, 227.
- [10] DADO, M. - TUREK, I. - ŠTELINA, J. - BITTERER, L. - TUREK, S. - GROLMUS, E. - STIBOR, P.: *Kapitoly z optiky pre technikov*, Žilina, 1998