

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Branislav Korenko

Autoreferát dizertačnej práce

OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY S ROZLOŽENÝMI PARAMETRAMI A ICH APLIKÁCIE

na získanie akademického titulu
„philosophiae doctor, PhD.“

v doktorandskom študijnom programe:
5.2.10 Teoretická elektrotechnika

Bratislava, 2012

Dizertačná práca bola vypracovaná v **dennej forme** doktorandského štúdia na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Branislav Korenko**
ÚE FEI STU
Ilkovičova 3
81219 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Jozef Jasenek, PhD.**
ÚE FEI STU
Ilkovičova 3
81219 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Ivan Kneppo, DrSc.**
TnUAD
Študentská 2
911 50 Trenčín

prof. RNDr. Ing. Ján Turán, DrSc.
KEMT FEI TUKE
Letná 9
042 00 Košice

Autoreferát bol rozoslaný:
(dátum rozoslania)

Obhajoba dizertačnej práce sa konáoh.

na FEI STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava.

doc. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
Dekan FEI STU

Obsah

Súhrn	3
Opis súčasného známeho stavu problematiky.....	4
Dosiahnuté výsledky	5
Prínos.....	14
Zoznam publikácií autora.....	15

Súhrn

V predkladanej práci sa zameriavame na problematiku optických vláknových senzorov (OVS) s rozloženými parametrami (OVSRP), resp. distribuovanými optickými vláknovými senzormi (DOVS), ktorých hlavnou výhodou je, že umožňujú merať veličinu fyzikálneho poľa distribuovane, na celej ich dĺžke.

V úvodných kapitolách sa venujeme detailnému rozdeleniu OVS z rôznych možných prístupov, popisujeme ich parametre a mechanizmy, ktoré vyvolávajú zmenu parametrov optického signálu v nich, a rôzne detekčné metódy. Špeciálne sme sa zamerali na senzory s Braggovou mriežkou (Fiber Bragg Grating, FBG), pri ktorých uvádzame aj ich detailnú analýzu a simulácie merania teploty a ťahu pomocou týchto senzorov.

V nasledujúcej časti práce sa venujeme špeciálnej optickej meracej metóde OTDR a jej vybraným variantom a to: OTDR na báze sčítavania fotónov a polarizačnej OTDR. Vysvetľujeme ich rozdiely v porovnaní s klasickou OTDR a ich možné využitie v kontexte OVSRP, pri detegovaní zmeny parametrov optického vlákna (OV) – najmä zmeny indexu lomu.

Jedným z hlavných senzorických mechanizmov, ktorý má vplyv na index lomu je elasto-optický efekt, preto mu v práci venujeme osobitnú pozornosť. Zameriavame sa na detailný rozbor daného javu či už v dvojrozmernom alebo trojrozmernom priestore. Predkladáme výsledky zo simulácie modelov OVSRP pri rôznych typoch namáhania ako je ťah, krut a tlak. V závere kapitoly popisujeme model OV s distribuovaným dvojlomom.

Dôležitou časťou experimentálnej práce bol návrh a realizácia prototypu optického vláknového reflektometra založeného na kombinácii polarizačnej OTDR a OTDR na báze sčítavania fotónov. Popisujeme preto jednotlivé bloky tohto zariadenia, ktoré boli samostatne realizované autorom. Ide najmä o laserový budiaci zdroj, optický prijímač, chladiacu komoru, štvorkanálový napájací zdroj a celkové finálne prevedenie zariadenia do 19'' rackového systému. Následne je tu uvedený podrobný popis experimentálnej aparatury realizovanej autorom pre meranie OVSRP. V experimentálnej časti predkladáme výsledky meraní na

aparátúre, ktoré dokumentujú niektoré hlavné parametre realizovaného reflektometra a taktiež výsledky tlakových senzorických aplikácií. V závere uvádzame návrh systému pre monitorovanie OVSRP.

Kľúčové slová: optické vlákno, optický vláknový senzor s rozloženými parametrami, OTDR, polarizačná OTDR, OTDR na báze sčítavania fotónov, distribuovaný dvojlom.

Opis súčasného známeho stavu problematiky

Vlastnosti optického vlákna (OV), najmä jeho schopnosť integrovať interakčné účinky vonkajších fyzikálnych polí pozdĺž svojej osi ho okrem klasického použitia na prenos signálov, priam predurčujú na využitie ako senzora rozloženia rôznych fyzikálnych veličín pozdĺž prakticky ľubovoľnej krivky v priestore. Ide o fyzikálne polia ako je pole elektrické, magnetické, teplotné, pole mechanických napätí a podobne [1]. Účinky týchto polí je možné monitorovať pomocou klasickej optickej časovej reflektometrie (OTDR- Optical Time Domain Reflectometry) [2] a tiež aj jej v súčasnosti zdokonaľovaných viacerých variantov [3]. Takéto senzory sa nazývajú senzory s rozloženými parametrami a majú veľmi široké pole aplikácií. V súčasnosti sa tejto problematike venuje veľká pozornosť nielen v európskom, ale aj v celosvetovom meradle. Ako príklad môžeme uviesť projekt na realizáciu ultrahlbokých geotermálnych vrtov Geothermal Anywhere, do ktorého je zapojená aj naša výskumná skupina.

V priebehu posledných rokov boli vyvinuté rôzne varianty OTDR v časovej oblasti [4,5] alebo vo frekvenčnej oblasti, ktoré sa líšia svojimi výkonnostnými parametrami – dynamickým rozsahom a najmä priestorovou rozlišovacou schopnosťou. Každý z týchto variantov je predurčený na isté špecifické aplikácie. Vývoj v tejto oblasti je zameraný na zvyšovanie priestorovej rozlišovacej schopnosti bez toho, aby to malo negatívne dôsledky na dynamický rozsah ako je to pri konvenčnej OTDR. Veľmi perspektívnou metódou pre aplikácie v senzorických systémoch je OTDR založená na metóde sčítavania fotónov [4]. Jej hlavná prednosť spočíva v takmer úplne digitálnom spracovaní meraného signálu, pričom sa s výhodou obchádza drift a nelinearita analógových zosilňovačov, konflikt medzi šírkou pásma a šumom, resp. dynamickým rozsahom a iné. Mimoriadne vhodným prostriedkom na monitorovanie priestorového rozloženia fyzikálnych polí je polarizačná optická reflektometria. Polarizačná OTDR je vhodná na snímanie akejkoľvek fyzikálnej veličiny, ktorá indukuje lokálny dvojlom vo vlákne. Pri väčšine reflektometrov sa využíva modulová štruktúra [6], ktorá zjednoduší celkovú konštrukciu. Prehľad teoretických základov viacerých

variantov OTDR, súvisiacich veľmi úzko s danou problematikou možno nájsť v monografii [3].

Literatúra:

- [1] A. J. Rogers: Polarization-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of fiedsdistribution, App. Optics, Vol. 20, No.6, 1981, pp. 1060-1074
- [2] Barnoski,M.K.and Jensen,S.M.:Fiber waveguide: a novel technique for investigating attenuation characteristics, Appl.Opt., Vol.15, No.9, 1976, p.2112-2115 domain reflectometer,J.Lightwave Tech., Vol.7, No.1, 1989
- [3] J. Jasenek, Optická vláknová reflektometria, Vydavateľstvo STU Bratislava, 2004, ISBN-80-227-2002-X
- [4] Jasenek, J.,Čermák,O.: Photon-counting reflectometer with correction of measured data, Journal of Electrical Engineering (EČ), Vol.45, NO.12.,1994, p.469-472
- [5] Takada, K. and all: Resolution controllable optical time-domain reflectometry based on low coherence
- [6] Листвин А.В. Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон, Москва • 2005 , ЛЕСАРпт, ISBN 5-902367-03-4

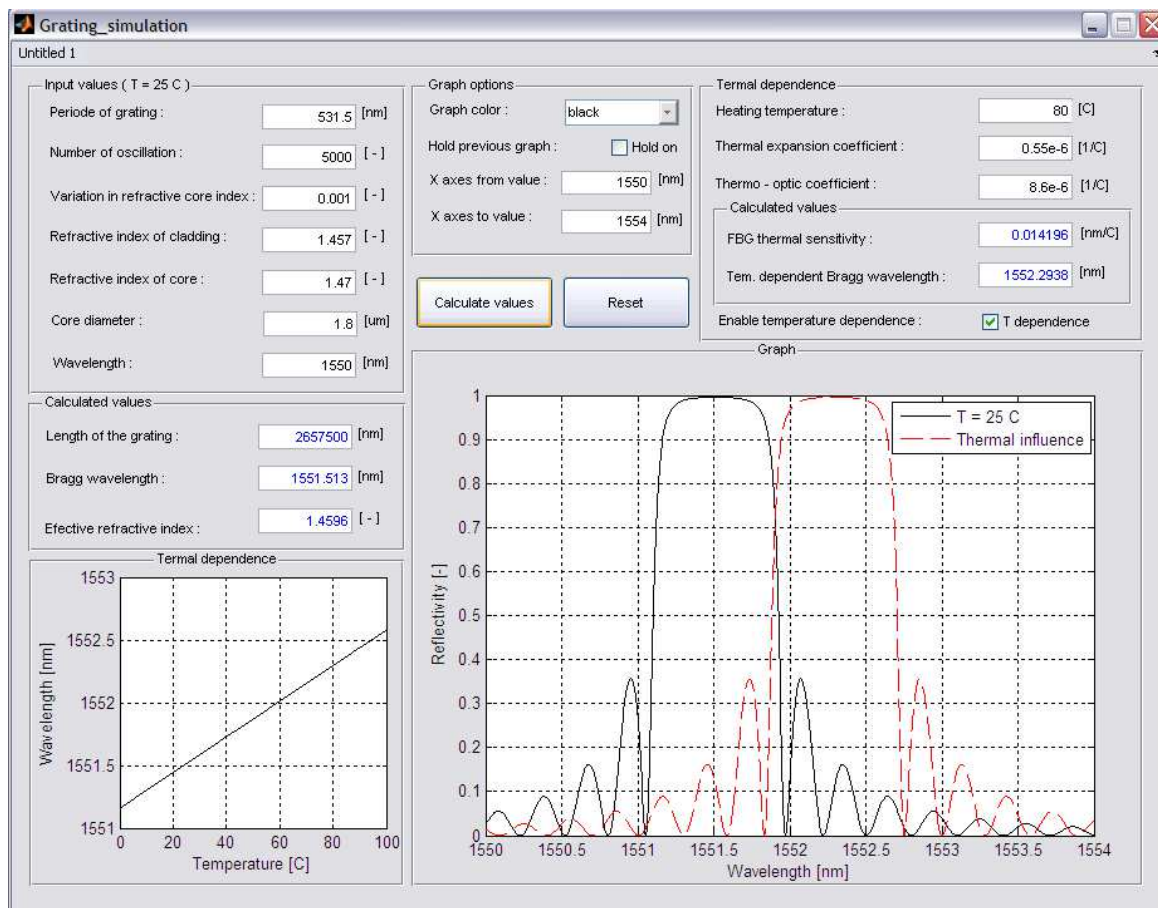
Dosiahnuté výsledky

V predloženej práci podrobne popisujeme dosiahnuté výsledky v problematike optických vláknových senzorov s distribuovanými parametrami, založenými najmä na využití kombinácie PC-OTDR a PO-OTDR. V úvode prinášame podrobný prehľad klasifikácie a aplikácií rôznorodých typov OV senzorov s dôrazom na spôsob modulácie optického signálu meranou veličinou.

V prvej časti popisujeme princíp klasických a distribuovaných senzorov a rôzne metódy merania. Zvýšenú pozornosť venujeme OVSRP a OVS založeným na princípe Braggovej mriežky (FBG). V tejto kapitole uvádzame nami zrealizovaný simulačný model senzora na báze FBG a zmeny jeho parametrov v závislosti od predĺženia v dôsledku ťahu a teplotnej rozťažnosti. Zrealizovaný numerický model reprezentuje obrázok 1. Obsahuje tri vstupné bloky pre priame zadávanie hodnôt. Blok *Input values* umožňuje editovať základné parametre optického vlákna a parametre FBG štruktúry. Blok *Thermal dependence* zahŕňa do výpočtu vplyv teploty. Tu sa môže zdefinovať teplota ohrevu, koeficient teplotnej rozťažnosti a termo - optický koeficient vlákna. Tretím editačným blokom je *Graph options*.

Umožňuje jednoduché nastavenia grafu, zmenu hraníc vlnovej dĺžky a funkciu *Hold on* (neprekresľovanie grafov z predchádzajúcich výpočtov). Výstup simulácie je reprezentovaný dvoma grafmi so závislosťami koeficientu odrazu od vlnovej dĺžky a samotnej vlnovej dĺžky od teploty. Ďalej výstup obsahuje dva bloky *Calculated values* s vypočítanými hodnotami

Braggovej vlnovej dĺžky, efektívneho indexu lomu, celkovej dĺžky FBG, teplotnej citlivosti a Braggovu vlnovú dĺžku pri vplyve teploty. Tieto výstupné parametre už nemá možnosť užívateľ meniť.

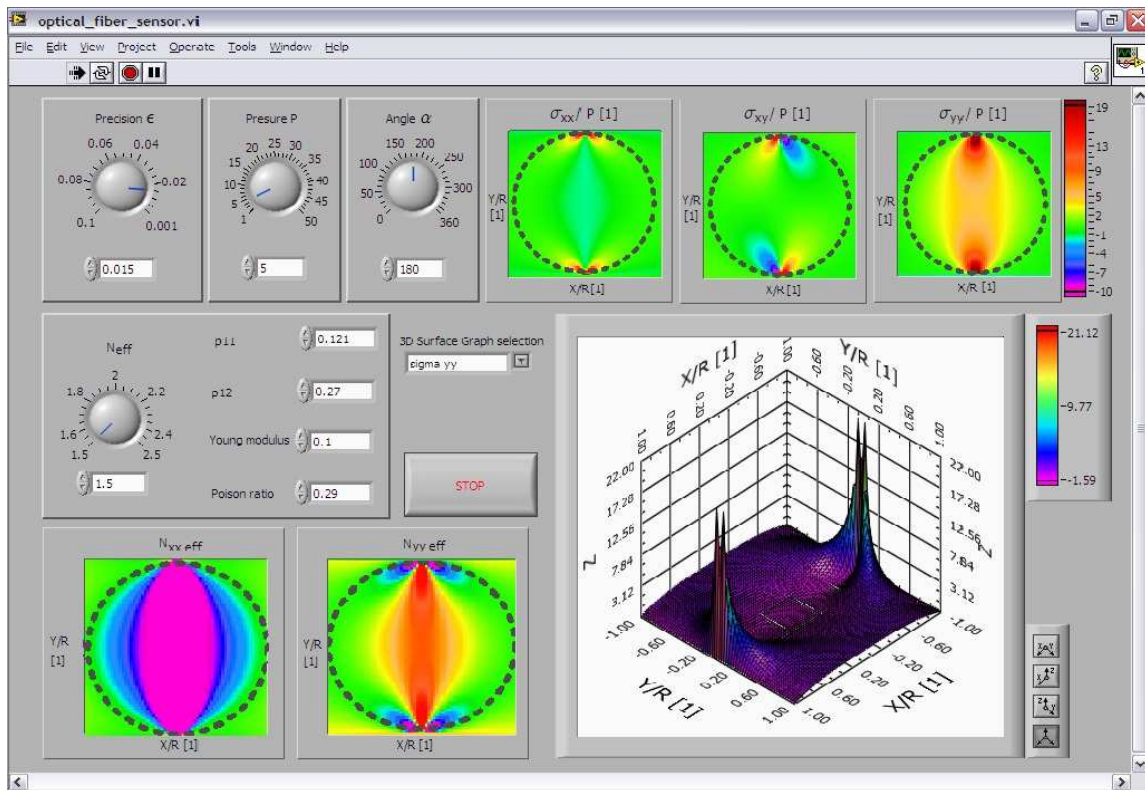


Obr.1 Simulačný model FBG senzora

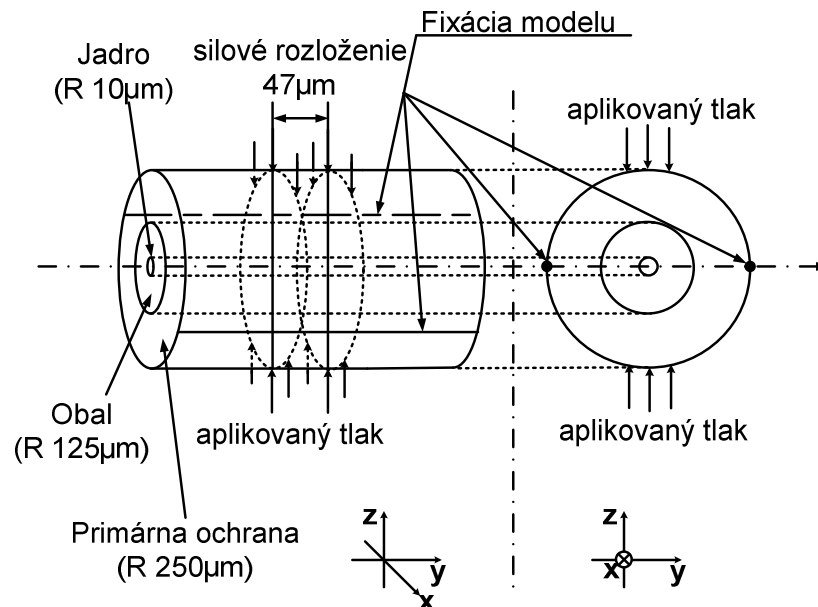
V tretej časti sa venujeme špeciálnej optickej metóde - OTDR a jej modifikáciám, najmä OTDR založenej na metóde sčítavania fotónov (PC-OTDR), polarizačnej OTDR (PO-TDR) a vysvetľujeme prínosy PC-OTDR v porovnaní s klasickou OTDR. Detailne sa venujeme teoretickému rozboru PO-OTDR v kontexte OVS RP na báze využitia štandardných telekomunikačných vlákien a čiastočne aj špeciálnych vlákien (PMF, PCF,...).

V štvrtej, teoretickej a ťažiskovej, časti sa venujeme podstate OVS s využitím elasto - optického javu. Uvádžeme simulačný model tohto javu a porovnáваме dosiahnuté výsledky s modelom realizovaným v prostredí LabView (Obr. 2) a ANSYS. Popisujeme 2D a najmä 3D (Obr. 3) modely pri rôznych typoch mechanického namáhania ako sú ťah (Obr. 5), tlak (Obr. 4) a torzia (Obr. 6). Z dosiahnutých výsledkov je možné usudzovať, že namáhanie ťahom a tlakom je vhodné pre senzorické aplikácie, pretože tieto mechanické namáhania

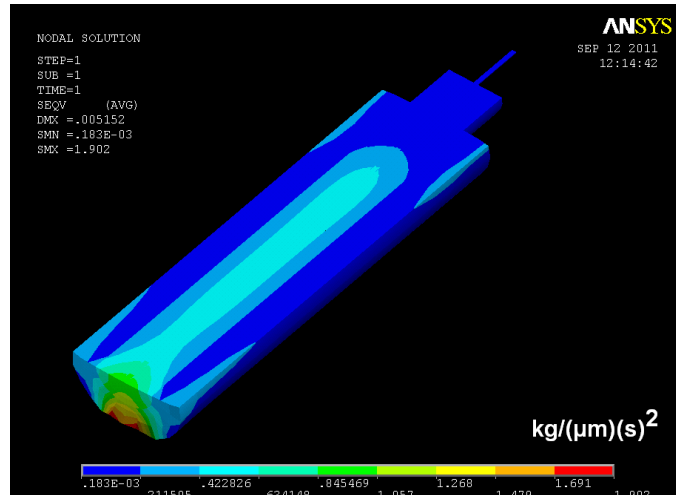
vytvárajú aditívny dvojlom. Ďalej uvádzame model vlákna s distribuovaným dvojlomom, ktorý prezentuje použitie OV ako OVS RP.



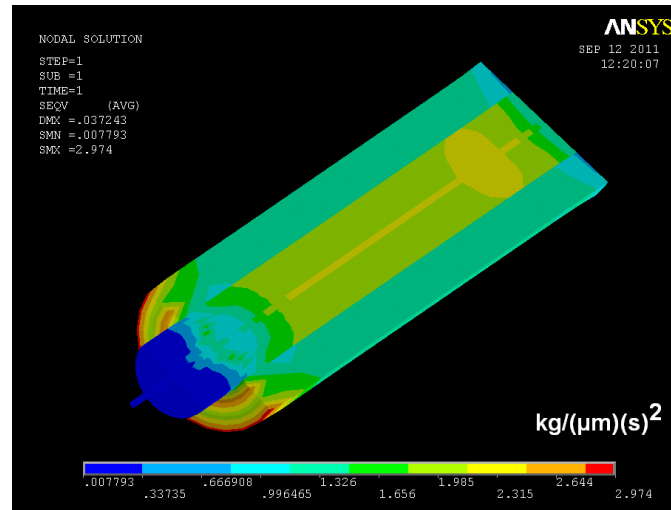
Obr.2 2D simulačný model tlaku na optické vlákno



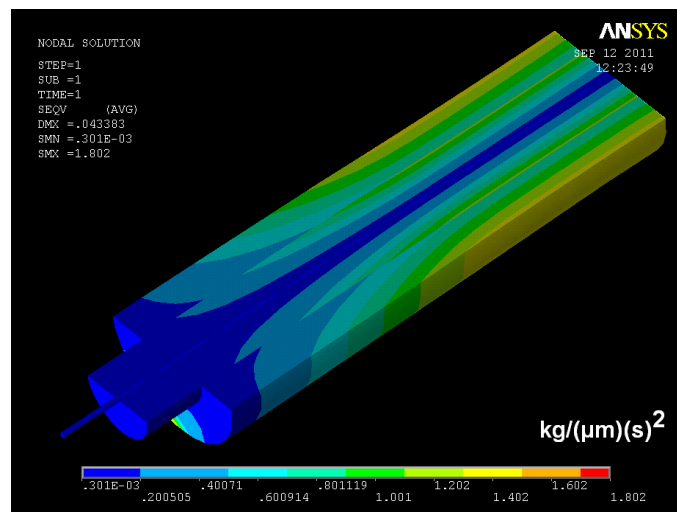
Obr.3 Zrealizovaný numerický 3D model



Obr.4 Rozloženie laterálneho tlaku „Von Mises“ v jadre OV

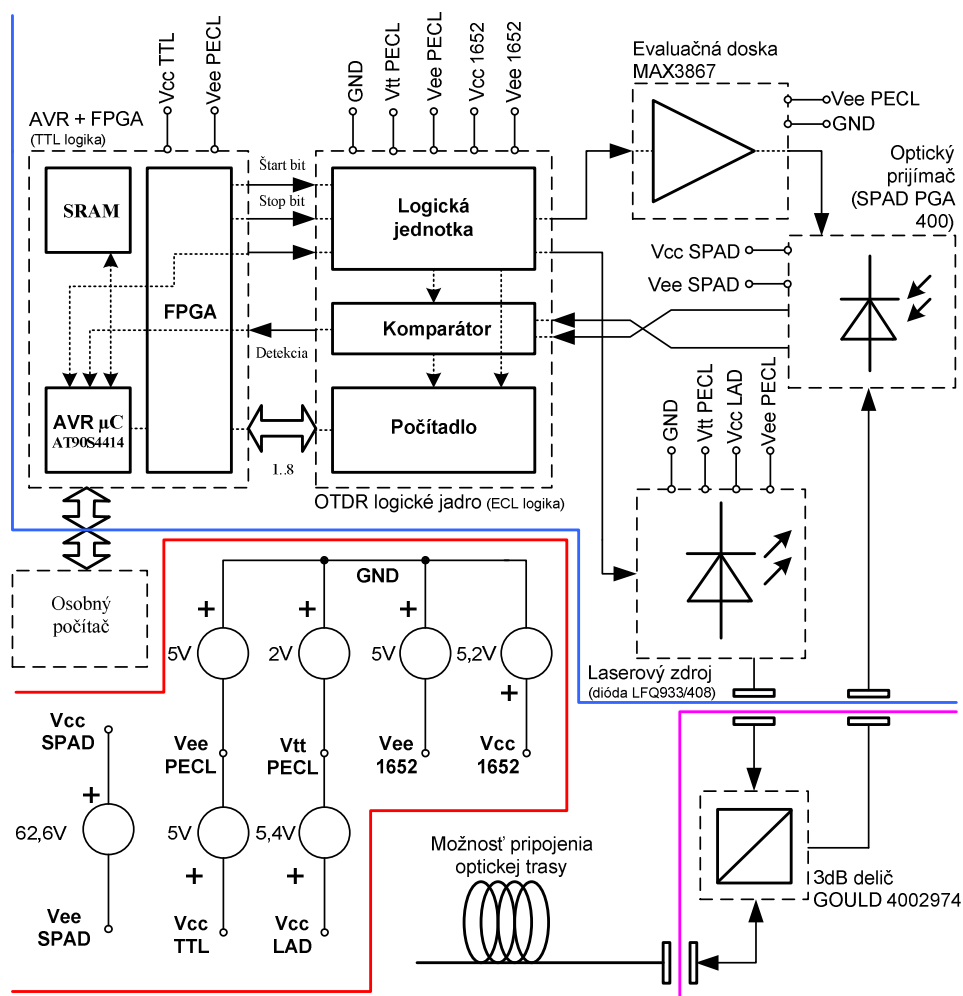


Obr. 5 Rozloženie tlaku „Von Mises“ v jadre OV pri namáhaní ťahom

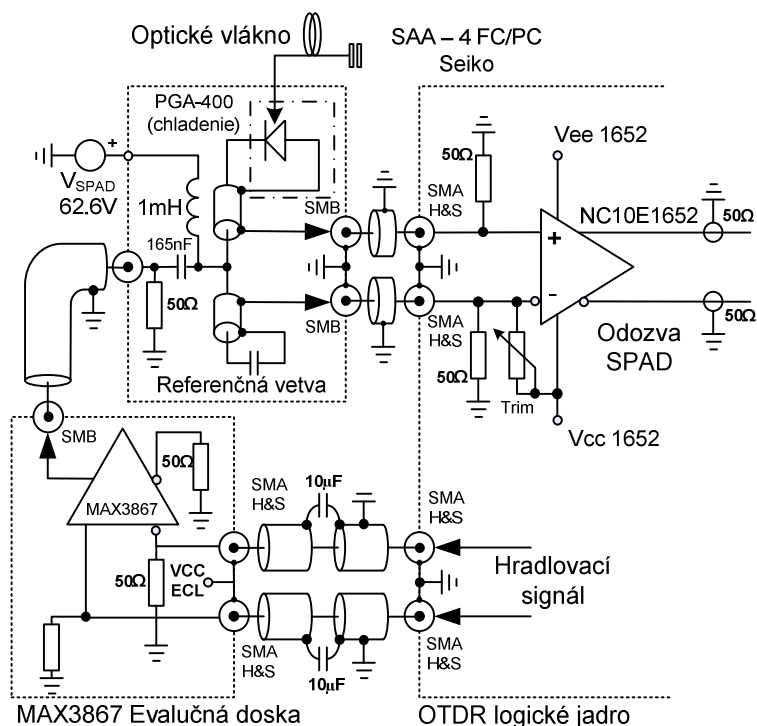


Obr. 6 Rozloženie tlaku „Von Mises“ v jadre OV pri torznom namáhaní

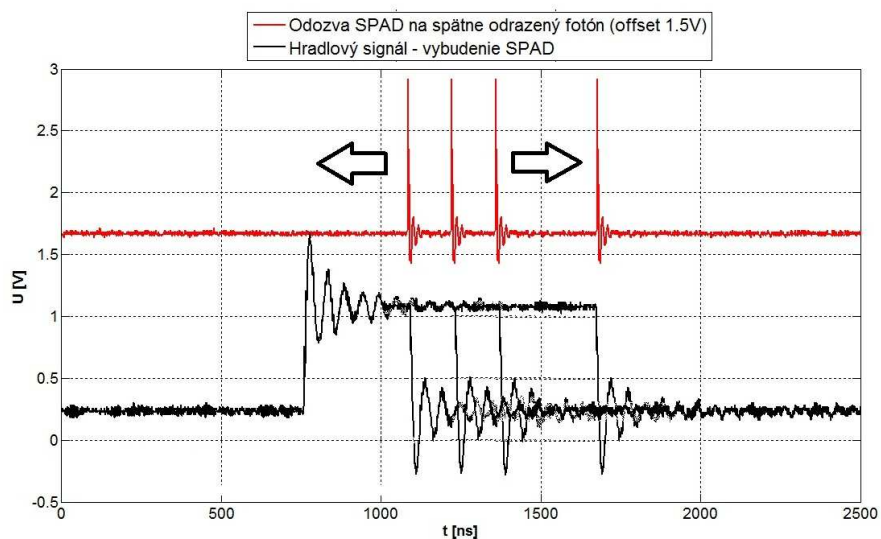
Piata kapitola je venovaná dôležitým konštrukčným detailom experimentálneho prototypu reflektometra (Obr. 7). Popisujeme tu optický prijímač založený na SPAD fotodetektore pracujúcom v Geigerovom režime (Obr. 8) s aktívnym zhášaním SPAD (Obr.9). Popisujeme tu ďalej optický vysielateľ so šírkou impulzu 5 ns, ktorú je ešte možné hardvérovým riešením upraviť na menej ako 500 ps, čím sa dá výrazne zlepšiť rozlišovacia schopnosť zariadenia. V tejto časti poukazujeme aj na konštrukciu chladiacej komory detektora, ktorá umožňuje chladenie SPAD až k teplotám - 60 °C. Ďalej popisujeme obvodovú realizáciu štvorkanálového napájacieho zdroja s digitálnym meraním prúdu a napätia s možnosťou regulácie napätia/prúdu na úrovni mV/mA s kontrolovaným priebehom napätia pri zapnutí, ale aj výpadku sieťového napätia. V podkapitolách popisujeme detailnejšie zrealizované zariadenie implementované do priemyselného modulárneho rackového systému a uvádzame jednotlivé dôležité časti celej experimentálnej meracej aparatury.



Obr. 7 Bloková schéma zrealizovaného prototypu reflektometra

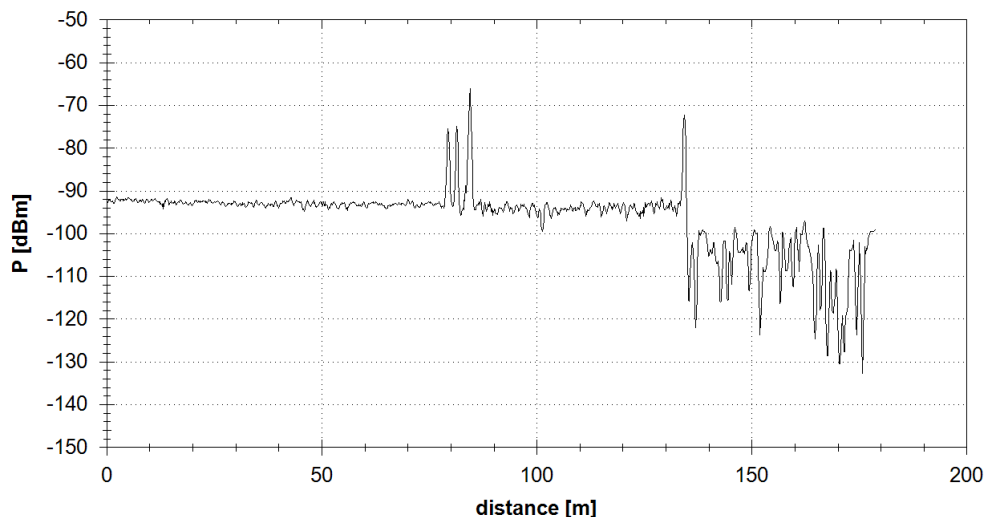


Obr. 8 Zrealizovaný optický prijímač

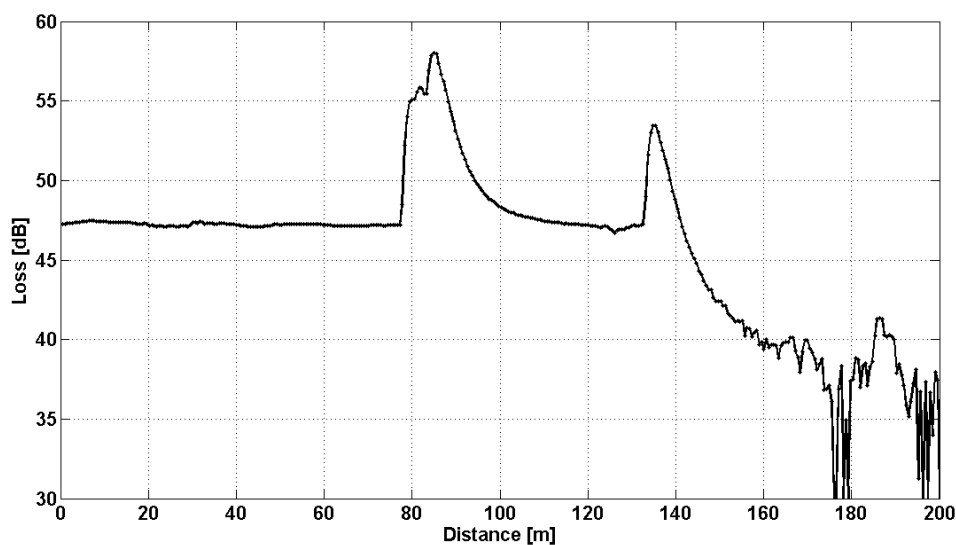


Obr. 9 Viacnásobné zhášanie lavíny

Šiesta časť sa venuje vybraným experimentálnym meraniam na zrealizovanom prototypu reflektometra a celej meracej aparatúre. V prvej podkapitole predkladáme viaceré porovnávacie merania optickej trasy s dôrazom na vyzdvihnutie parametrov ako rozlišovacia schopnosť a šírka mŕtvej zóny. Z nameraných výsledkov je vidieť výrazné výhody metódy PC-OTDR (Obr. 10) v porovnaní s meraním na komerčnom analógovom OTDR (Obr.11).

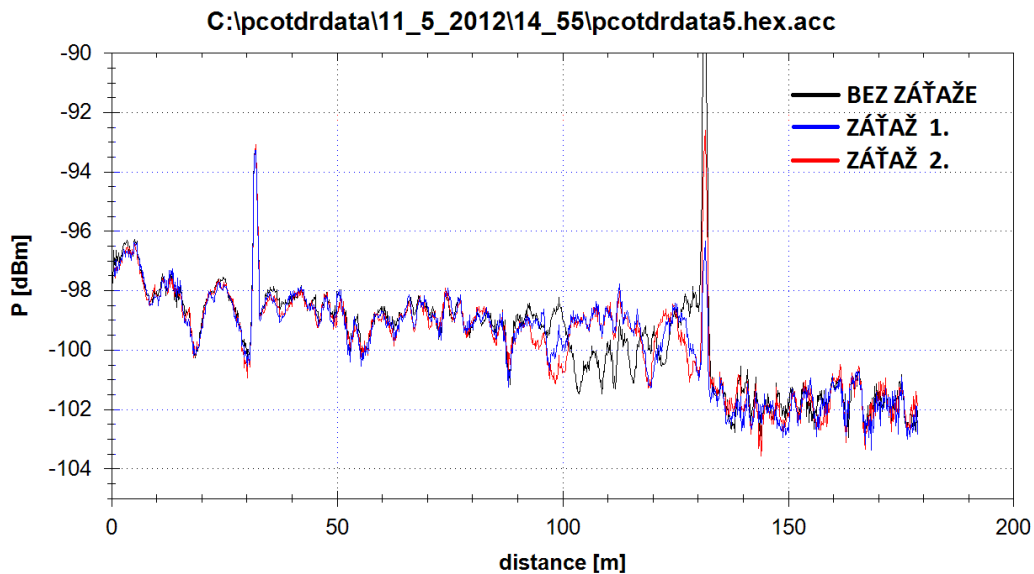


Obr. 10 Nameraný reflektogram na experimentálnom reflektometri



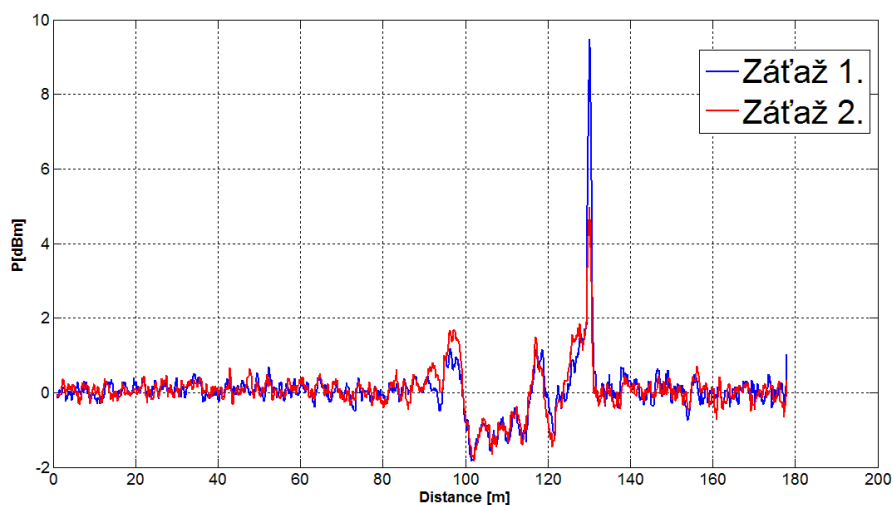
Obr. 11 Nameraný reflektogram na komerčnom reflektometrom MTS / T-BERD 6000L

Druhým meraním sa snažíme poukázať na možnosť využitia adaptívneho aktivovania detektora v čase, čo môže byť s výhodou použité pri adaptívnom senzorickej systéme, resp. môže poslúžiť na skrátenie času merania. V tretej časti kapitoly predkladáme originálne výsledky merané pomocou inovatívnej kombinácie metódy PC a PO-OTDR v kontexte senzorickej aplikácie. Z nameraných výsledkov je vidieť (Obr. 12), že prvá záťaž, cca 4 kg, a následne druhá záťaž, cca 5,4 kg, na cca 40 cm úseku OV jasne ovplyvnili detegovaný spätne rozptýlený výkon. Značne sa to prejavilo najmä pri uhle polarizátora $\theta_p = 22^\circ 30'$, kde prvá záťaž vyvolala zmenu 1 dBm a druhá až necelé 2 dBm, čo je presvedčivý dôkaz indukovaného dvojlomu záťažou.



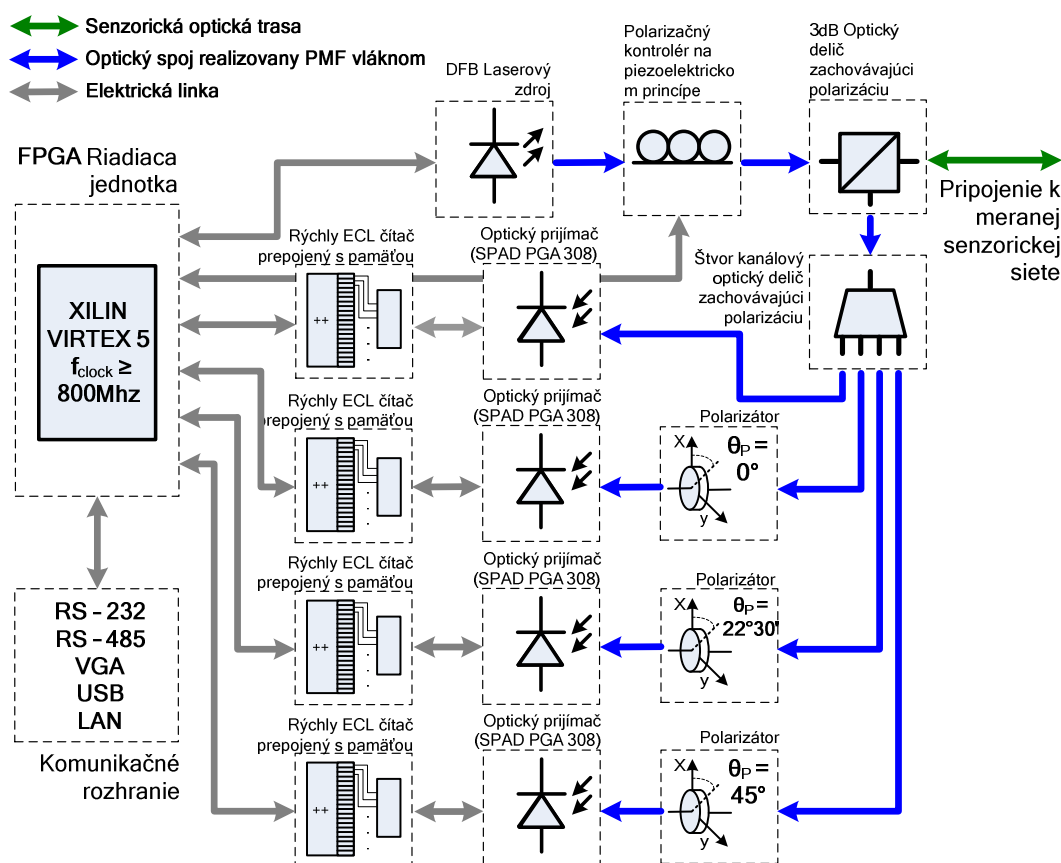
Obr. 12 PO-PC-OTDR $\theta_p = \{ 2230^\circ \}$ reflektogram

Ďalším dôležitým poznatkom, ktorý je badateľný z rozdielov výsledkov „s a bez“ tlaku (Obr. 13) je, že po mieste aplikácie tlaku (vzdialenosť $>100\text{m}$) je vidieť, že výkony detegované pri prvej a druhej záťaži sú takmer bez zmeny, čo je v súlade s teóriou uvedenou v podkapitole 3.3.2. To znamená, že aplikovaným tlakom sme iba zmenili polarizačné vlastnosti, resp. dvojlom v mieste aplikácie tlaku, ďalej sa polarizačné vlastnosti vlákna teda nemenili. Jednoznačne môžeme preto tvrdiť, že kombináciou PC- a PO-OTDR môžeme realizovať plne distribuovaný OVS, je ale nutné viac sa zamerať na spracovanie nameraných spätne odrazených výkonov pri jednotlivých uhloch polarizátora a získané výsledky prepojiť s vytvorenými modelmi.



Obr. 13 Rozdiel nameraných výkonov pri špecifickej záťaži od nameraného priebehu bez záťaže, $\theta_p = 2230^\circ$

Je dôležité poznamenať, že použité senzorické vlákno sa nevyznačovalo žiadnou špecifickou konštrukciou, či už mechanickou alebo materiálovou. To otvára nové možnosti v konštruovaní OVSRP, kde je častokrát nutné pri meraní mechanických veličín použiť špeciálne meracie metódy založené na nelineárnych javoch ako Ramanov alebo Brillouinov rozptyl. V súčasnej dobe ale vysoká cena týchto aparátúr a ich možnosť nasadenia v poľných podmienkach neumožňuje ich masové využitie. Taktiež realizácia špeciálnych senzorických štruktúrovaných vlákien – fotonických kryštálov je značne technologicky a finančne náročná úloha. Preto popísaná teória, jednotlivé metódy, modely a finálna realizácia experimentálnej aparatury je značným prínosom v odvetví vláknovej sensoriky a môže byť vhodným podkladom pre realizáciu takýchto inteligentných senzorických systémov (Obr. 14) s distribuovanými parametrami ako uvádzame v závere poslednej kapitoly.



Obr. 14 Návrh senzorického meracieho systému

Prezentované výsledky boli získané v rámci riešenia vedeckého projektu VEGA 1/0617/09 „Optické vláknové senzory a ich aplikácie“.

Prínos

- realizácia numerického modelu FBG senzorov, ktorý umožňuje simulovať tepelnú rozťažnosť a mechanické zmeny indexu lomu,
- realizácia 2D numerického modelu mechanického namáhania optického vlákna a elasto optického javu, transformujúceho aplikovaný tlak na zmenu indexu lomu vo vlákne,
- realizácia 3D modelu v prostredí ANSYS pre simuláciu ťahu, laterálneho tlaku a krutu na optické vlákno pre vyšetrenie tenzora tlaku v jadre,
- analýza špeciálnych optických meracích metód ako OTDR na báze sčítavania fotónov a polarizačnej OTDR,
- realizácia kaskádneho modelu optického vlákna s náhodným natočením rýchlej osi segmentov, ktorá reprezentuje náhodné rozloženie cirkulárneho dvojlomu (nelinearity v geometrii vlákna)
- obvodová realizácia experimentálneho reflektometra na báze kombinácie OTDR na báze sčítavania fotónov a polarizačnej OTDR,
 - realizácia optického prijímača, na báze hranového detektora,
 - realizácia optického vysielača, umožňujúceho adaptabilné aktivovanie detektora
 - chladiaca komora na báze Peltierových článkov,
 - viackanálový zdroj,
 - implementácia celého zariadenia do rackového systému,
- realizácia experimentálneho pracoviska na meranie PO-PC-OTDR,
- realizácia senzorického merania na experimentálnom PO-PC-OTDR reflektometri, ktorá potvrdzuje možnosť využitia tejto metódy pri distribuovaných senzoroch,
- návrh senzorického meracieho systému vychádzajúci z praktických skúseností autora na základe zrealizovaného prototypu.

Zoznam publikácií autora

- [1] Korenko, Branislav -- Hlaváč, Marek -- Červeňová, Jozefa -- Jasenek, Jozef, Excitation of Semiconductor Laser for OTDR Based on Photon Counting. Acta Electrotechnica et Informatica Vol. 9, No. 4. s. 3--8. ISSN 1335-8243.
čl. v recenzovanom domácom čas.
- [2] Korenko, Branislav -- Hlaváč, Marek, Budenie polovodičového lasera pre OTDR so sčítaním fotónov. In ŠAGÁTOVÁ, A. -- PETRISKA, M. -- PAVLOVIČOVÁ, J. ŠVOČ 2007. Zborník víťazných prác : Bratislava, Slovak Republic, 25.4.2007. Bratislava: STU v Bratislave, 2007, ISBN 978-80-227-2650-4.
prís. v domácom zbor.
- [3] Korenko, Branislav -- Červeňová, Jozefa -- Jasenek, Jozef, Optické vláknové senzory na báze Braggovej mriežky. In ŠAGÁTOVÁ, A. -- PETRISKA, M. -- PAVLOVIČOVÁ, J. ŠVOČ 2008 : Zborník víťazných prác. Bratislava, Slovak Republic, 23.4.2008. Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2008, ISBN 978-80-227-2865-2.
prís. v domácom zbor.
- [4] Korenko, Branislav -- Jasenek, Jozef, Polarization Optical Domain Reflectometry used for Sensing Measurements. In ŠAGÁTOVÁ, A. -- STACHO, M. -- PAVLOVIČOVÁ, J. ŠVOČ 2009 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník víťazných prác. Bratislava, Slovak Republic, 29.4.2009. Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2009, ISBN 978-80-227-3094-5.
prís. v domácom zbor.
- [5] Korenko, Branislav -- Jasenek, Jozef -- Hlaváč, Marek, Optické vláknové senzory s rozloženými parametrami. In Optické komunikácie 2010 : Praha, 21.-22.10.2010. Praha: Action M, 2010, s. 63--72. ISBN 978-80-86742-29-8.
prís. v zahraničnom zbor.
- [6] Korenko, Branislav -- Jasenek, Jozef -- Červeňová, Jozefa -- Hlaváč, Marek, Optical Fiber Sensors with Distributed Parameters Based on Optical Fiber Reflectometry. Advances in Electrical and Electronic Engineering : [on-line] Vol. 9, No. 1. s. 48--55. ISSN 1804-3119.
čl. v zahraničnom recenzovanom čas.
- [7] Korenko, Branislav, Birefringence Dependence to Pressure Fields in Optical Fiber Sensors. In KOZÁKOVÁ, A. ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. Bratislava: STU v Bratislave, 2010, ISBN 978-80-227-3303-8.
prís. v domácom zbor.
- [8] Červeňová, Jozefa -- Jasenek, Jozef -- Janíček, František -- Korenko, Branislav, Teaching of Electromagnetism Using e-Courses. In Proceedings of the Joint International IGIP-SEFI : Annual Conference 2010. Diversity unifies - Diversity in Engineering Education, 19th - 22 th September 2010, Trnava, Slovakia. Brussel: SEFI, 2010, ISBN 978-2-87352-003-8.
prís. v domácom zbor.

- [9] Iglarčík, Matúš -- Červeňová, Jozefa -- Korenko, Branislav, Použitie metódy OTDR na senzorické účely. In ŠAGÁTOVÁ, A. -- PETRISKA, M. -- PAVLOVIČOVÁ, J. ŠVOČ 2011 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011. Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2011, s. 448-452. ISBN 978-80-227-3508-7.
prís. v domácom zbor.
- [10] Korenko, Branislav -- Jasenek, Jozef -- Červeňová, Jozefa, Optical Fiber Pressure Sensors. In KOZÁKOVÁ, A. ELITECH'11 : 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 17 May, 2011. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2011, s. 1--6. ISBN 978-80-227-3500-1.
prís. v domácom zbor.
- [11] Korenko, Branislav -- Jasenek, Jozef -- Červeňová, Jozefa, Optical Fiber Sensors with Distributed Parameters and Optical Time-Domain Reflectometry (OTDR). In ITSS 2010. 20th International Travelling Summer School on Microwaves and Lightwaves : Metz, France, 3.-9.7.2010. Supélec, 2010.
prís. v zahraničnom zbor.
- [12] Korenko, Branislav -- Jasenek, Jozef -- Červeňová, Jozefa, Smart Optical Fiber Sensors. In Optické komunikace 2011 : Praha, 20.-21.10.2011. Praha: Action M, 2011, s. 39--42. ISBN 978-80-86742-31-1.
prís. v zahraničnom recenzovanom zbor. (uvedené v indexe Web of Science)

Publikácie - abstrakty v recenznom konaní - podané do tlače:

- [13] Korenko, Branislav -- Černý, Marek, Multichannel stand alone digital voltmeter, Electronic Design Network, EDN, <http://www.edn.com>,
prís. v zahraničnom recenzovanom časopise
- [14] Červeňová, Jozefa -- Korenko, Branislav -- Jasenek, Jozef, Magnetic field measurements involved in teaching of electromagnetism, Magnetic Measurements 2012
prís. v domácom recenzovanom zborníku
- [15] Jasenek, Jozef -- Červeňová, Jozefa -- Korenko, Branislav, Fiber Optic Sensor for the Space Distribution of Magnetic Field, Magnetic Measurements 2012,
prís. v domácom recenzovanom zborníku
- [16] Korenko, Branislav -- Jasenek, Jozef -- Červeňová, Jozefa, Pockels and Kerr effect investigation in fibre bragg gratings (FBG), Magnetic Measurements 2012
prís. v domácom recenzovanom zborníku

