

Ján Hudec

Autoreferát dizertačnej práce

**VÝSKUM A VÝVOJ SENZORICKÝCH SYSTÉMOV S BEZDRÔTOVÝM
PRENOSOM NA MONITOROVANIE TEPLOTNO-VLHKOSTNÉHO REŽIMU**

na získanie akademickej hodnosti:
v doktorandskom študijnom programe:
v študijnom odbore

philosophiae doctor (PhD.)
Fyzikálne inžinierstvo
5.2.48. Fyzikálne inžinierstvo

Miesto a dátum: **Bratislava, 15.08.2016**

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ján Hudec

Autoreferát dizertačnej práce

**VÝSKUM A VÝVOJ SENZORICKÝCH SYSTÉMOV S BEZDRÔTOVÝM
PRENOSOM NA MONITOROVANIE TEPLOTNO-VLHKOSTNÉHO REŽIMU**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Fyzikálne inžinierstvo

Miesto a dátum: Bratislava, 15.08.2016

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

na Fyzikálnom ústave Slovenskej akadémie vied.

Predkladateľ: Ján Hudec
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Fyzikálny ústav Slovenskej akadémie vied,
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava,

Školiteľ: Ing. Ľudovít Kubičár, DrSc.
Fyzikálny ústav Slovenskej akadémie vied,
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava

Oponenti: Ing. Peter Matiašovský, CSc.
Ústav stavebníctva a architektúry Slovenskej akadémie vied,
Dúbravská cesta 9, 845 03 Bratislava 45

prof. RNDr. Libor Vozár, PhD.
Dekanát Fakulty prírodných vied (FPV)
Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre
Tr. A. Hlinku 1, 949 74 Nitra.

Autoreferát bol rozoslaný: 16.8.2016

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: dňa 25.8:2016

na Fyzikálnom ústave SAV, Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava,
v miestnosti číslo 295

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava)

Obsah

Obsah.....	3
1 Úvod.....	4
2 Problematika	4
3 Ciele práce	5
3.1 Hot-ball senzor	5
3.2 Metodika merania.....	5
3.3 Aplikácia a overenie v praxi	6
4 Dosiahnuté výsledky	6
4.1 Hot-ball senzor	6
4.2 Metodika merania.....	7
4.3 Aplikácia a overenie v praxi	8
5 Zhrnutie	14
Zoznam použitej literatúry	16
6 Publikácie predkladateľa	17
7 Účasť na konferenciách a študijných pobytoch	18

1 Úvod

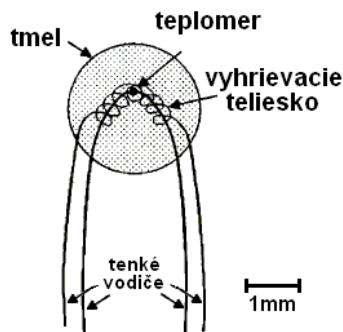
Na túto tému som sa prihlásil, lebo bola blízka mojej dovtedajšej študijnej činnosti. V rámci predošlého štúdia som pracoval na návrhu a konštrukcii bezdrôtovej meracej jednotky pre senzory hot-ball a rovnomenne nazvanú metódu merania. Popri návrhu a konštrukcii zariadenia, určeného predovšetkým pre skúmanie tejto inovatívnej techniky, som získal aj predstavu o problematike senzorov a o možnosti ich aplikácie. Na doktorandské štúdium som nastúpil s úmyslom upresniť a popísať doterajšie poznatky, identifikovať nedostatky senzorov, navrhnúť a zrealizovať ich nápravu a posunúť tak túto ideu bližšie k jej uplatneniu v praxi.

Táto práca bližšie oboznamuje s problematikou, sumarizuje doterajšie zistenia a predpoklady, poukazuje na problémy a prekážky súvisiace s riešením témy a opisuje navrhované riešenia a dosiahnuté výsledky.

2 Problematika

Fyzikálny ústav Slovenskej akadémie vied sa okrem iného zaoberá aj výskumom a vývojom rôznych typov senzorov a stacionárnych aj dynamických metód určovania termofyzikálnych vlastností materiálov. Tieto metódy sú základom diagnostických techník využiteľných pre viaceré odbory ľudskej činnosti.

Dôležitou etapou je vývoj senzora typu hot-ball a jeho praktické využitie. Senzor hot-ball pozostáva z dvoch prvkov. Tvorí ho nízkovýkonové vyhrievacie teliesko a blízko pri ňom uložený teplomer. [1], [2] Oba prvky sú umiestnené v malej guľôčke s priemerom približne 3 mm. Táto štruktúra je názorne zobrazená na Obr. 1.



Obr. 1: Schematický náčrt vnútornej štruktúry senzoru hot-ball [1]

Vyhrievacie teliesko má za úlohu dodať do sústavy energiu vo forme tepla, teplomer má za úlohu teplotné zmeny, čiže odozvu sústavy, v ktorej je senzor pevne zabudovaný, premeniť na merateľnú elektrickú veličinu. O jej prevod do číslícovej podoby, záznam, uloženie a prenos do počítača sa postará meracia jednotka, ktorej návrh bol predmetom mojej bakalárskej a diplomovej práce. Ďalej sa už namerané krivky spracovávajú špeciálnym programom v počítači. Výsledkom spracovania sú termofyzikálne parametre média, v ktorom je senzor uložený, konkrétne tepelná vodivosť a teplotná vodivosť média.

Ak senzor vložíme do porézneho materiálu, ktorý termofyzikálnymi parametrami odzrkadľuje obsah vody v póroch, môžeme senzor použiť na meranie vlhkosti na báze termofyzikálnych parametrov.

Problémom je, že tento idealizovaný opis nie je jednoduché realizovať v praxi, kvôli neideálnosti materiálov, vyhrievacieho telieska, teplomeru a obmedzeným konštrukčným možnostiam.

3 Ciele práce

Ciele práce môžeme zovšeobecnene zhrnúť do troch hlavných bodov:

3.1 Hot-ball senzor

V čase začiatku môjho doktorandského štúdia existovali prvé prototypy hot-ball senzorov, ale ich presnosť, citlivosť, opakovateľnosť, ani trvácnosť z ďaleka neboli uspokojivé. Nakoľko v rámci Fyzikálneho ústavu pôsobíme pod hlavičkou Termofyzikálneho laboratória, chceli sme vyvinúť hot-ball senzor, použiteľný nie len na monitoring, ale aj na metrologické účely, čiže presné merania termofyzikálnych parametrov materiálov. Výroba senzorov pritom nesmela byť zdĺhavá, ani drahá. Návrh a realizáciu takéhoto výrobného postupu považujeme za ťažiskový cieľ môjho doktorandského štúdia.

3.2 Metodika merania

S konštrukciou hot-ball senzorov úzko súvisí aj metodika merania a vyhodnocovania nameraných dát, čiže premena časovo-teplotných priebehov odozvy senzora na termofyzikálne parametre média (meraného materiálu, v ktorom je senzor vložený). Cieľom je zvoliť vhodný matematický model sústavy, vyvinúť a zdokumentovať univerzálny spôsob, ako merať, ako voliť časový interval

pre vyhodnotenie odozvy, čiže ten, v ktorom odozva zodpovedá modelu a postup, ako získať správne hodnoty tepelnej a teplotnej vodivosti média.

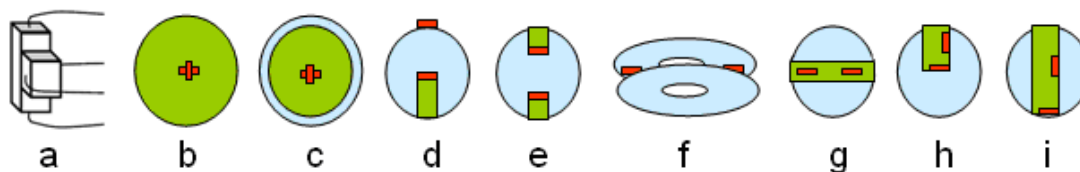
3.3 Aplikácia a overenie v praxi

Praktické uplatnenie hot-ball senzorov môžeme rozdeliť na dve základné oblasti: metrologickú a monitorovacia. V metrologickej je úlohou zmerať a určiť presné absolútne hodnoty termofyzikálnych parametrov neznámeho materiálu. V monitorovacej je úlohou opakovane merať termofyzikálne parametre monitorovaného materiálu, ktoré odrážajú stav nejakého procesu, napr. chemickej reakcie, alebo napr. zmeny vlhkosti (obsahu vody) v poréznych štruktúrach. Pri druhej oblasti je skôr dôležitá relatívna presnosť a citlivosť senzoru. Cieľom bolo nájsť vhodné aplikácie, v ktorých je možné overiť funkčnosť našej metódy a senzorov, alebo ich porovnať s inými metódami.

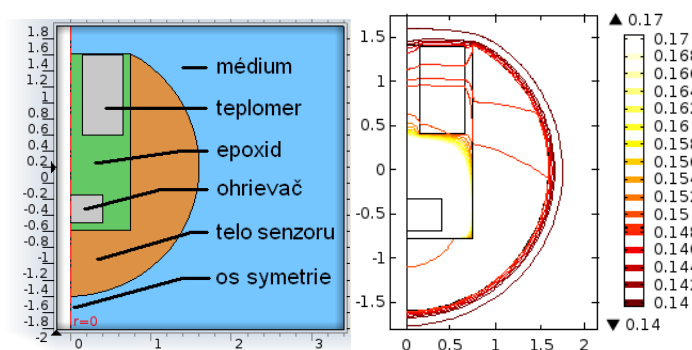
4 Dosiahnuté výsledky

4.1 Hot-ball senzor

Za pomoci množstva konštrukčných experimentov v podobe realizácie viacerých variánt polohy súčiastok (ohrievača a teplomeru) v hot-ball senzore (Obr. 2) a za pomoci počítačových simulácií sme pochopili javy, pomery, spôsob šírenia tepla a statické aj dynamické rozloženie teplotného poľa vo vnútri senzoru (Obr. 3).

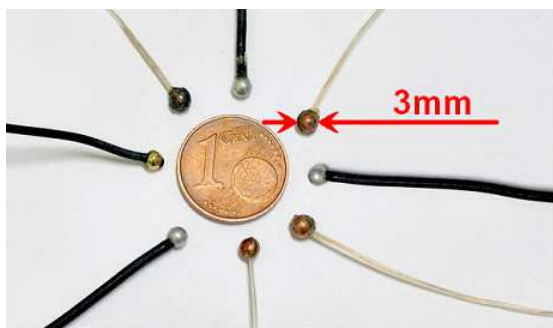


Obr. 2: Varianty konštrukcie hot-ball senzorov, znázornenie umiestnenia súčiastok



Obr. 3: Ilustračný obrázok simulácie a zobrazenia teplotného poľa v programe Comsol

Na základe týchto poznatkov a skúseností aj z iných odborov (elektronika) sme navrhli a overili spôsob konštrukcie hot-ball sensorov. Počas vývoja vznikli použiteľné senzory rôznych variánt (Obr. 4).



Obr. 4: Ilustračný obrázok skonštruovaných hot-ball sensorov

Podarilo sa vymyslieť a vyvinúť postup, ktorého prevažnú časť urobia automatizované stroje vo vysokej kvalite. Ide konkrétne o výrobu flexibilných plošných spojov, presné osadenie miniatúrnych súčiastok na tento plošný spoj a jeho kvalitné zaizolovanie kaptonovou fóliou a ochranným lakom. Navrtanie dierok do medených guľôčok a vloženie plošného spoja do navrtanej dierky (Obr. 5 vľavo) sa zatiaľ realizuje manuálne, ale je to pomerne jednoduchá činnosť, ktorá nevyžaduje žiadne špeciálne odborné vzdelanie. V tomto stave sa pri tisíc kusových sériách zmestia výrobné náklady na hot-ball senzory pod 10 Eur na kus. Postup sme aj realizovali. Výsledok realizácie v podobe troch kusov hotových hot-ball sensorov na báze flexibilných plošných spojov je na Obr. 5 vpravo.



Obr. 5: Konštrukcia (vľavo) a 3 hotové hot-ball senzory na báze flexibilných plošných spojov

4.2 Metodika merania

Počas vývoja hot-ball sensorov sme súčasne vyvinuli sofistikovaný spôsob, ako aj zo sensorov s vážnejšími nedostatkami získať dobré výsledky. Dosiahli sme to voľbou vhodného modelu sústavy (senzor a médium), ktorý najlepšie vystihoval správanie sústavy [3], konkrétne modelu zohľadňujúceho tepelnú kapacitu senzoru a vyvinutím algoritmu pre správnu voľbu časového intervalu, v ktorom sa

správanie senzoru najviac približuje k modelu. Algoritmy využívajú Levenberg-Marquardtovou metódou aproximácie, ktorá pracuje na báze hľadania minima súčtu druhých mocnín chýb. [4] Neskôr sa senzory zdokonalili a voľba intervalu, v ktorom sa senzory zhodujú s modelom, sa zjednodušila, lebo interval sa značne zväčšil, čo navyše skrátilo čas potrebný na vykonanie merania.

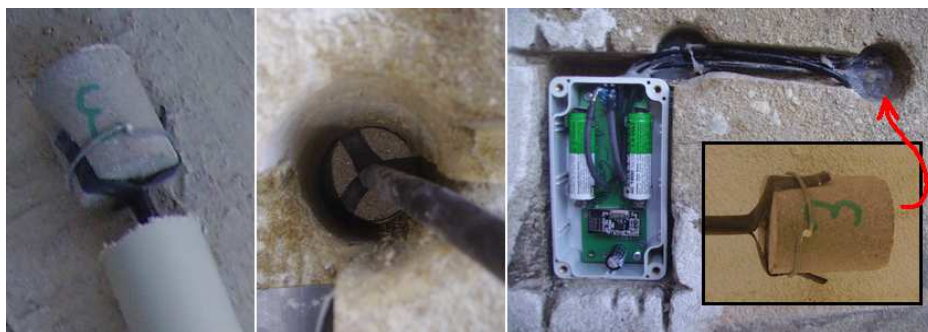
K metodike vyhodnocovania sme vytvorili aj počítačové programy, v ktorých sú algoritmy implementované a prispôsobené tak, aby nadväzovali na výstupy z meracej jednotky. Niektoré programy sú aj grafické, interaktívne a uľahčujú pochopenie algoritmov.

4.3 Aplikácia a overenie v praxi

Už počas vývoja senzorov sme sa snažili o ich aplikáciu a testovanie v praxi, aby sme získali informácie a skúsenosti, ktoré pomohli usmerniť vývoj s ohľadom na budúce uplatnenie senzorov. Skoršiu montáž pred kvalitou bolo to potrebné uprednostniť hlavne pri monitorovaní teplotno-vlhkostného režimu budov, pri ktorom trvá mesiace až roky, kým sa nameria dostatok dát na to, aby sa dali pozorovať dlhodobé zmeny a javy.

Aplikačné ciele sa podarilo splniť v oblasti monitoringu, aj v metrologickej oblasti.

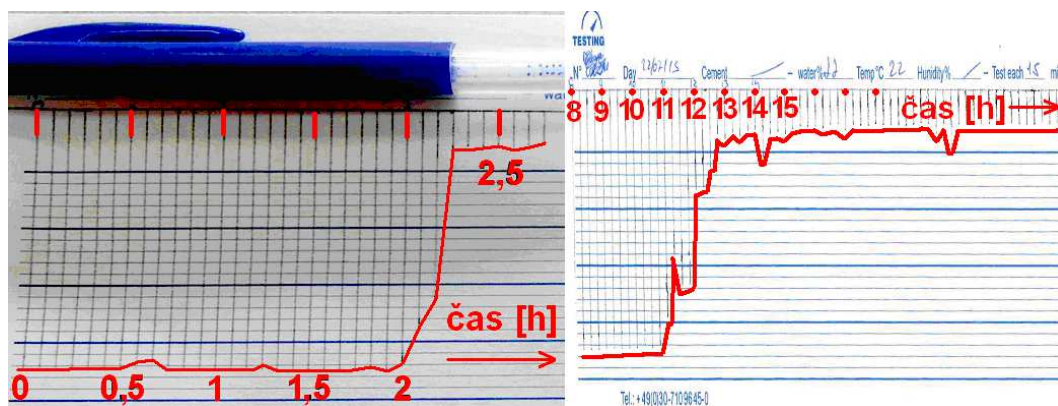
Pre účel monitorovania teplotno-vlhkostného režimu sme skonštruovali vlhkosťné senzory, ktoré pracujú na báze merania tepelnej vodivosti. Ide o valčeky o priemere a výške cca 3 cm, ktoré vzniknú navŕtaním dier do monitorovaného objektu korunkovým vrtákom. Do týchto valčekov sa osadia hot-ball senzory, ktoré merajú ich tepelnú vodivosť a z princípu aj podávajú informáciu o lokálnej teplote v mieste montáže senzoru. Tieto vlhkosťné senzory sme skalibrovali pre suchý a vodou nasýtený stav, v dôsledku čoho môžeme nameranú tepelnú vodivosť prepočítať na vlhkosť. Nové kalibrované vlhkosťné senzory sme osadili na významný stavebný objekt – do pilierov Chrámu sv. Jakuba v Levoči (Obr. 6).



Obr. 6: Inštalácia senzorov a meracej jednotky na Chráme sv. Jakuba v Levoči

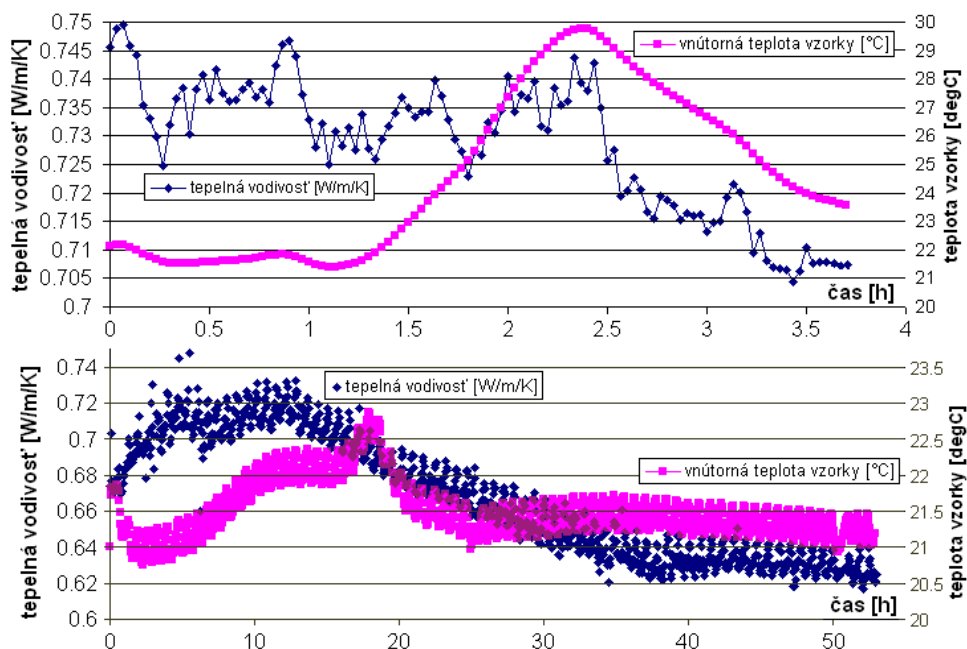
Senzory boli osadené do hĺbok 10 a 40 cm, počas rekonštrukcie, v rámci ktorej sa robila aj izolácia múrov od zemnej vlhkosti, ktorá od začiatku stavby absentovala. Meraním sme potvrdili, že v múroch sa nachádza pomerne vysoká úroveň vlhkosti. V zimnom období sme namerali opakované fázové prechody – cykly mrznutia a topenia vody prítomnej v póroch. Tento jav, vzhľadom na stavebný materiál (pieskovec s vyššou porozitou), potvrdzuje vysoký obsah vlhkosti. [5], [6] Tento proces najkritickejšie ovplyvňuje degradáciu a zvetrávanie stavebných materiálov. V ďalších rokoch môžeme sledovať, či izolácia múrov zníži hladinu vlhkosti a akým spôsobom sa zmeny prejaví. Vďaka synchronizovane merajúcim senzorom osadeným v rôznych hĺbkach môžeme sledovať transport vlhkosti a tepelnú bilanciu v danom mieste. Mechanizmus postupu vlhkosti je v stavebnej fyzike dôležitý. [7], [8]

Ďalší, ale tentokrát krátkodobý monitorovací experiment sme realizovali v rámci ukážky využitia hot-ball metódy pri monitorovaní chemických reakcií, v tomto prípade pri tuhnutí stavbárskeho lepidla určeného primárne na lepenie obkladov. Experiment bol realizovaný v laboratóriu firmy Saint-Gobain, Belgicko, ktorá je svetovým lídrom na trhu stavebných materiálov, ktoré aj vyvíja. Pritom sa používa veľa rôznych meracích a hodnotiacich techník pre charakterizáciu vyvinutých materiálov, ako aj pre spätnú väzbu počas ich vývoja. Našu metódu sme aplikovali na charakterizáciu tuhnutia dvoch vyvíjaných stavebných lepidiel na lepenie obkladov, ktoré tuhnú rôzne rýchlo. Priebeh tepelnej vodivosti nameranej senzormi hot-ball sme porovnali s priebehmi z tzv. ihlového penetračného testu, ktorý je založený na mechanickom princípe – ihla so závažím je opakovane spúšťaná z rovnakej výšky a zaznamenáva sa hĺbka prieniku hrotu do tuhnuceho lepidla. Priebeh tuhnutia je zrejмый z výstupu ihlového testu na Obr. 7.



Obr. 7: Výsledky metódy ihlového penetračného testu

Merali sme dve vzorky – rýchlo a pomaly tuhúce stavebné lepidlo pre lepenie obkladov. Pre porovnanie uvádzame výsledky tepelnej vodivosti a teploty nameranej hot-ball senzormi (Obr. 8).



Obr. 8: Výsledky metódy hot-ball vo forme priebehov teploty a tepelnej vodivosti počas tuhnutia

Preukázali sme, že priebehy tepelnej vodivosti korelujú s mechanickým ihlovým penetračným testom a teda, že hot-ball metóda je použiteľná aj na tieto účely. Veľkou výhodou oproti ihlovému testu, aj oproti mnohým iným metódam je, že hot-ball metóda je použiteľná in situ a poskytuje lepšiu informáciu o priebehu tuhnutia, navyše nie iba na povrchu, ale aj v hĺbke materiálu.

Senzor a metódu hot-ball sme prezentovali aj pri in situ meraní vo firme Hunstman v Belgicku, ktorá sa zaoberá vývojom polyuretánových pien a termoizolačných materiálov. Merali sme vzorky s extrémne nízkou tepelnou vodivosťou, menej ako 0,02 W/m/K. V Tab. 1 sú zobrazené nekorigované aj korigované výsledky hot-ball metódy v porovnaní so stacionárnou metódou chránenej horúcej platne („Guarded Hot Plate“), ktorej výsledky sú považované za referenčné.

Tab. 1

vzorka	tepelná vodivosť (hot-ball) [W/m/K]	tepelná vodivosť (met. h. platne), refer. [W/m/K]	hot-ball chyba [%]	hot-ball korigovaný	chyba po korekcii [%]
vzorka 1	0.0292	0.0185	57.97	0.0185	-0.23
vzorka 2	0.0265	0.0165	60.56	0.0165	-0.25
vzorka 3	0.0277	0.0175	58.25	0.0174	0.45

Chyby boli síce vysoké, čo sme vzhľadom na vtedajšiu konštrukciu senzoru s hrubými elektrickými prívodmi aj predpokladali, ale dôležité je, že boli aj korigovateľné zohľadnením parazitného odvodu tepla elektrickými vodičmi. Po zohľadnení klesli chyby pod 0,5 %. Bolo nám povedané, že výsledky sú podstatne lepšie ako dostávajú z hot-disk prístroja, ktorý testovali predtým. Firma prejavila záujem o používanie našej techniky, avšak bolo by potrebné špecializovať používateľské rozhranie na ich potreby, za účelom zjednodušenia merania.

Ďalej sme sa zapojili do „slepého“ porovnávacieho testu na parafínovej vzorke. Parafín sme miernym ohriatím roztopili, ponorili sme doň hot-ball senzor a nechali zatuhnúť. Výsledky sme zaslali organizátorovi testu, ktorý nám obratom poslal výsledky ostatných laboratórií. Všetky sú uvedené v Tab. 2.

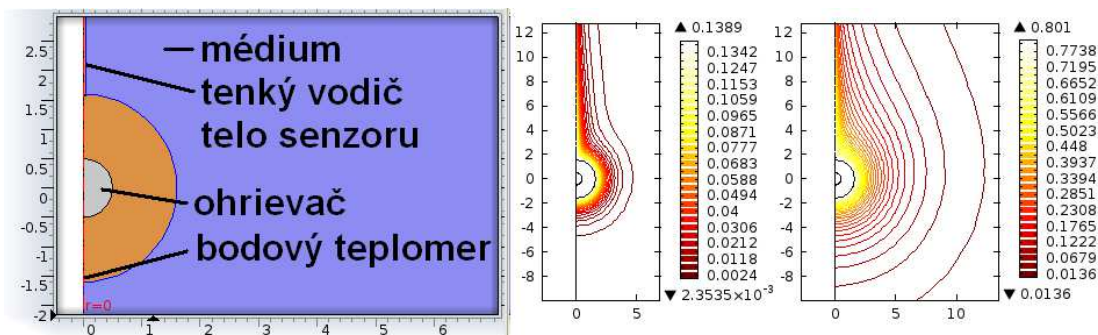
Tab. 2

Pracovisko	Metóda	Výsledok, tepelná vodivosť
SAV, Bratislava	hot-ball	0,258 W/m/K
Experta, Belgicko	hot-disk	0,313 W/m/K
Univerzita Orizaba, Mexiko	hot-disk / hot-wire	0,273 W/m/K
KU Leuven, Belgicko	met. chrán. hor. platne	– (čaká sa)

Prínosom experimentu bola možnosť porovnať našu techniku so zahraničnými kolegami. Hodnotu z metódy chránenej horúcej platne [9], [10], ktorá je považovaná za najpresnejšiu, sa kvôli poruche prístroja bohužiaľ nepodarilo do uzavretia práce získať.

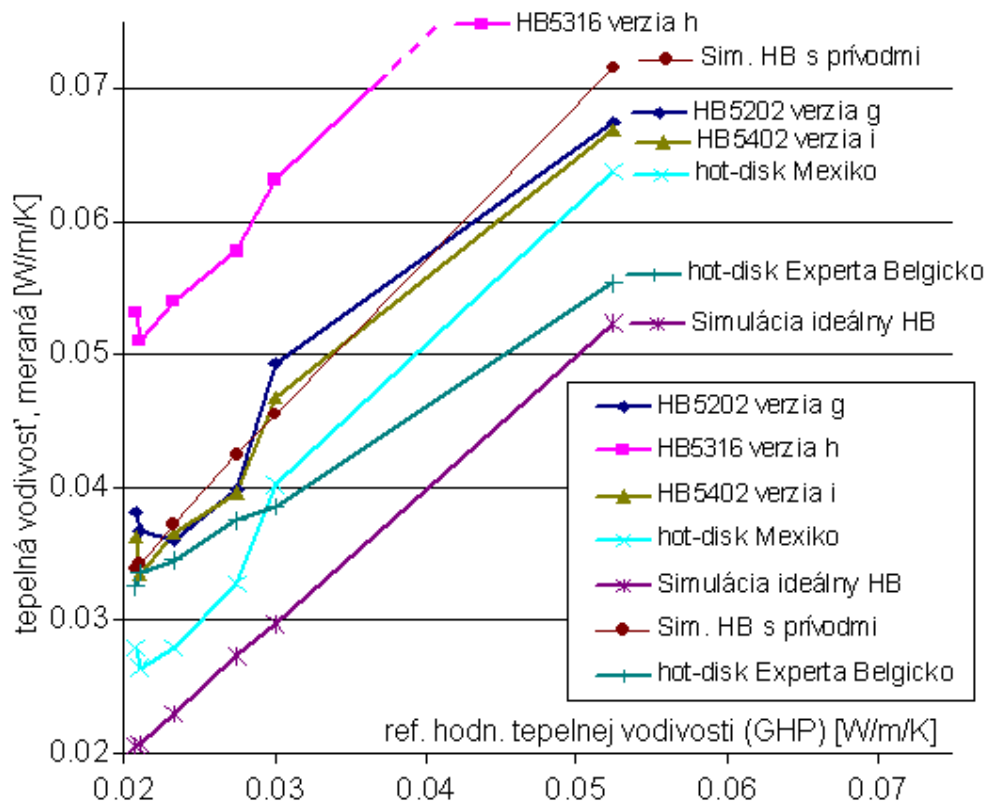
Ako známe termofyzikálne laboratórium sme boli oslovení s ponukou o zapojenie sa do medzinárodného testu a porovnania rôznych metód pre meranie tepelnej vodivosti. Projekt nazvaný "Round Robin Test" bol zameraný na meranie polyuretánových pien s veľmi nízkymi tepelnými vodivosťami, prechodovými ("transient") metódami. Na 6-tich získaných vzorkách sme priebežne urobili merania s viacerými variantami konštrukcie hot-ball senzorov. Po získaní referenčných hodnôt od organizátora testu sme odhalili systematickú chybu merania spôsobenú nezohľadneným parazitným odvodom tepla elektrickými prívodmi nášho (a pravdepodobne nie len nášho) senzoru. Pri meraní materiálov s veľmi nízkou tepelnou vodivosťou sa tieto javy prejavujú výraznejšie a je potrebné ich zohľadniť. Pre potvrdenie tejto hypotézy, sme urobili aj simulačný experiment v programe Comsol. Nasimulovali sme meranie najprv bez a potom s prívodnými vodičmi s prierezom zodpovedajúcim skutočným senzorom.

Simulačný model a rozloženie teplotného poľa v meranom materiáli, ktoré je deformované vplyvom prívodných vodičov, je zobrazené na Obr. 9.



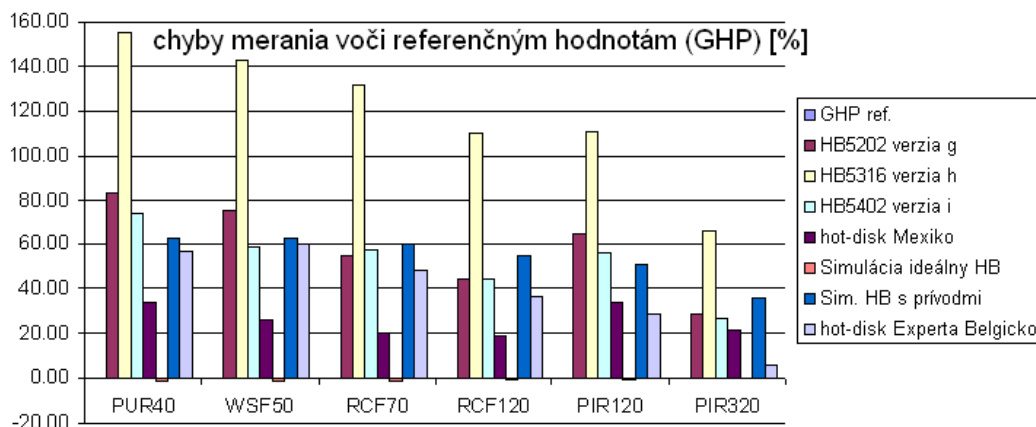
Obr. 9: Simulácia parazitného odvodu tepla prívodnými vodičmi v polyuretánovej pene PIR120

Simulované dáta sme spracovali tak, ako dáta namerané skutočnými senzormi a spolu so všetkými meraniami sme ich zobrazili v grafe. Na Obr. 10 sú výsledky zobrazené v závislosti k referenčným hodnotám meraným metódou chránenej horúcej platne (GHP).



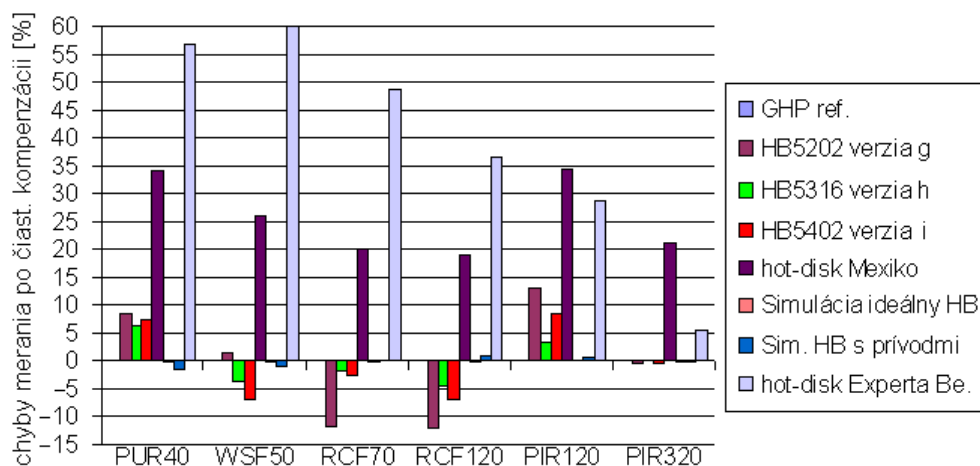
Obr. 10: Grafické zobrazenie nameraných verzus referenčných hodnôt tepelnej vodivosti pien

Na Obr. 11 sú v stĺpcovom diagrame zobrazené percentuálne chyby merania, pričom hodnoty hot-ball (HB) senzorov sú nekorigované.



Obr. 11: Percentuálne vyjadrenie chýb merania voči referenčným hodnotám (HB sú nekorigované)

Tento experiment bol našou prvou praktickou skúsenosťou s meraním veľmi nízkych tepelných vodivostí senzorom hot-ball. Zistili sme, že aj keď sú elektrické prívody senzorov už na hranici technických možností (pri zachovaní dostatočnej mechanickej robustnosti), správne meranie nízkych tepelných vodivostí sa nezaobíde bez zohľadnenia vplyvu prívodov. Percentuálne vyjadrené chyby merania po vhodnej korekcii vplyvu prívodov sú v stĺpcovom diagrame na Obr. 12.



Obr. 12: Chyba merania oproti referenčným hodnotám, po lineárnej kompenzácii

Vidíme, že senzory hot-ball poskytujú veľmi dobré výsledky.

Neprehliadli sme ani nápadne podobné tvary kriviek na Obr. 10 (aj s „hot-disk Mexiko“), naznačujúce istú systematickosť chýb, ktoré zostanú po kompenzácii vplyvu prívodov. Tie mohli byť spôsobené napr. starnutím vzoriek, alebo mierne odlišnými podmienkami pri referenčnom meraní.

Každopádne, tento experiment preukázal, že naše hot-ball senzory sú aj bez kalibrácie (výsledky priamo z aproximácie odozvy) porovnateľné s metódami, ktoré sa používajú vo svete a po kalibrácii majú potenciál dosahovať presnosti rádovo v jednotkách percent, aj pri meraní látok s veľmi nízkymi tepelnými vodivosťami.

Môžeme povedať, že ciele práce, ktoré sme si vytýčili, sa nám podarilo splniť. No napriek tomu v tejto tematike, najmä v oblasti monitoringu, zostáva veľa príležitostí pre pokračovanie výskumných aktivít.

5 Zhrnutie

Primárnym predmetom tejto práce bol výskum a vývoj senzorického systému pre monitorovanie teplotno-vlhkostného režimu budov. V čase začiatku môjho štúdia už bolo pre úlohu senzora vlhkosti navrhnuté využitie princípu jej určovania na základe tepelnej vodivosti. Pre lokálne meranie tepelnej vodivosti je veľmi vhodná metóda horúcej guľôčky (hot-ball). Je to pomerne nová, zatiaľ nepoužívaná metóda. V čase začiatku môjho štúdia existovali ešte iba prototypy hot-ball sensorov, ktoré neboli dostatočne kvalitné a používali sa iba v stacionárnom režime merania. Základným cieľom práce bolo teda vyvinúť hot-ball senzory a ich konštrukčný postup tak, aby boli kvalitné, aby ich správanie zodpovedalo matematickému modelu (čiže aby sa dali používať aj v dynamickom režime) a aby sa dali vyrábať vo väčších počtoch s prijateľnou náročnosťou a cenou výroby. Tento cieľ sa nám podarilo splniť. V rámci práce sme vyvinuli aj metodiku merania a vyhodnotenia nameraných odoziev, čiže ich premenu na výsledky vo forme termofyzikálnych parametrov. Dynamický režim použitia senzoru rozšíril výstup merania (tepelnú vodivosť) aj o parameter teplotnej vodivosti. Z nich a z hustoty materiálu sa dá dopočítať aj tepelná kapacita meraného materiálu. Vyrobené senzory sme aj uplatnili v praxi. Jednu dvojicu sme osadili na významnej kultúrnej pamiatke, Chráme sv. Jakuba v Levoči, kde sme spustili proces monitorovania teplotno-vlhkostného režimu s kalibrovanými vlhkostnými senzormi. V práci sú prezentované niektoré vybrané javy, ktoré sme zaznamenali. Okrem toho sme sa so senzormi zapojili do porovnávacích testov merania tepelnej vodivosti na medzinárodnej úrovni a dosiahli sme dobré, konkurencieschopné výsledky. Možnosti využitia sensorov sme tiež prezentovali vo firmách, ktoré buď pri svojej činnosti využívajú meranie termofyzikálnych parametrov, alebo v takých, kde sme

ukázali možnosť využitia merania tepelnej vodivosti hot-ball senzormi ako inovatívnu alternatívu charakterizácie procesu chemických reakcií v oblasti stavebníctva, napr. tuhnutie betónu, resp. stavebných lepidiel.

Dizertačná práca môže slúžiť aj ako užitočný študijný materiál pre výskumníkov, ktorí budú pokračovať v téme monitorovania tepelno-vlhkostného režimu využívajúc tento dobre navrhnutý, odladený a overený merací systém, pri ktorého návrhu a zostrojení bolo potrebné mať a využiť interdisciplinárne vzdelanie z oblasti elektroniky (návrh meracej jednotky), informatiky (vytvorenie algoritmov a programov na výpočet a spracovanie dát a i.) a fyziky (vedenie tepla atď.).

Téma práce bola pomerne pragmatická, skôr inžinierskeho charakteru, ale napriek tomu sa nám podarilo vytvoriť aj významný vedecký prínos, najmä vo forme nového senzoru založeného na metóde horúcej guľôčky, resp. hot-ball metóde, vrátane vyvinutia postupu jeho sériovej výroby a meracieho algoritmu.

Najvýznamnejším vedeckým prínosom je vyvinutie kvalitného, pomerne lacného a veľmi praktického hot-ball senzoru termofyzikálnych parametrov (tepelnej a teplotnej vodivosti), vrátane meracieho prístroja a algoritmu pre vyhodnocovanie meraní, čo umožnilo (zatiaľ čiastočné) etablovanie metódy hot-ball na medzinárodnej úrovni. Z dôvodu praktickosti tvaru a odolnosti senzoru, ako aj nenáročnosti prístrojového vybavenia potrebného k meraniu termofyzikálnych parametrov, má senzor a metóda zaručene veľkú perspektívu pre uplatnenie v technickej praxi, čo sme tiež preukázali v rámci viacerých experimentov.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Patentový dokument:
Fyzikálny ústav Slovenskej akadémie vied, Bratislava, SK: Metóda merania tepelnej vodivosti materiálov a senzor na jej vykonávanie. Kubičár Ľudovít, Ing., DrSc., Bratislava, SK; Vretenár Viliam, Ing., Spišská Nová Ves, SK; Štofanič Vladimír, Ing., PhD., Bratislava, SK; Int. Cl. (2010) G01N 25/18 G01K 15/00, Druh dokumentu B6, Slovenská Republika, číslo patentu 287386.; 29.7.2010
- [2] Krempaský J.: Meranie termofyzikálnych veličín, Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied Bratislava, 1969, 288. str.
- [3] Kubičár Ľ., Vretenár V., Štofanič V., Boháč V.: Hot-Ball Method for Measuring Thermal Conductivity. In: International Journal of Thermophysics, 2010, 31:1904–1918
- [4] Press W. H., Teukolsky S. A., Wetterling W. T., Flannery B. P.: Numerical Recipes The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, 6.9.2007, str. 801 – 816, ISBN 0521880688, 9780521880688
- [5] Vretenár V., Kubičár Ľ., Boháč V., Tiano P., Thermophysical Analysis of Gioia Marble in Dry and Water-Saturated States by the Pulse Transient Method, Int. J. of Thermophysics, 28,(2007) Monumental Surfaces - SMW08, Florence, 2008, 53 – 62
- [6] Kubičár Ľ., Vretenár V., Boháč V., Tiano P., Thermophysical analysis of sandstone by pulse transient method, Int. J. of Thermophysics, 27(2006) 200 – 234
- [7] Künzl, H. M.: Simultaneous heat and moisture transport in buildings components, Fraunhofer Institute of buildings Physics, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart 1995, str. 5 – 18
- [8] Kubičár, Ľ., Boháč, V., Vretenár, V., Barta, Š., Neuer, G., Brandt, R.: Thermophysical properties of heterogeneous structures measured by pulse transient method, Int. J. Thermophys., Vol.24, No. 6, 2005, str. 1949-1962
- [9] ASTM (1985), Standard test method for heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded hot plate apparatus. ASTM Standard C177-85. American Society for the Testing of Materials, Philadelphia, PA, USA
- [10] ISO 8302:1991(E). International standard: Thermal insulation – Determination of steady state thermal resistance and related properties – Guarded hot-plate apparatus

6 Publikácie predkladateľa

- HUDEC, J. - FIDRÍKOVÁ, D. - VRETENÁR, V. - DIEŠKA, P. - KUBIČÁR, Ľ. *Variations of heat and moisture transport through walls of the St. Martin Cathedral tower in Bratislava.* In Thermophysics 2013 - Conference Proceedings : 18th International Meeting of Thermophysical Society, November 13-15, 2013, Podkylava, Slovak Republik. Editor Oldřich Zmeškal. - Bratislava : Institute of Physics, Slovak Academy of Science in Bratislava, 2013, p. 229-233. ISBN 978-80-214-4801-4. Typ: AFB
- HUDEC, J. - ŠTOFANIK, V. - KUBIČÁR, Ľ. *Wireless device for monitoring the temperature-moisture regime in situ.* In Thermophysics 2014: 19th International Meeting of Thermophysical Society, October 8-10, 2014, Podkylava, Slovak Republic: Conference Proceedings. - Brno : University of Technology, 2014, p. 171-176. ISBN 978-80-214-5034-9. Typ: AFD
- HUDEC, J. - ŠTOFANIK, V. - VRETENÁR, V. - KUBIČÁR, Ľ. *Measuring reliability and accuracy analysis of the hot-ball sensor.* In Thermophysics 2014: 19th International Meeting of Thermophysical Society, October 8-10, 2014, Podkylava, Slovak Republic : Conference Proceedings. - Brno : University of Technology, 2014, p. 47-52. ISBN 978-80-214-5034-9. Typ: AFD
- HUDEC, J. - ŠTOFANIK, V. - VRETENÁR, V. - KUBIČÁR, Ľ. *Wireless device for monitoring the temperature- moisture regime in situ.* In Geophysical Research Abstracts, 2014, vol. 16, p. 319. ISSN 1607-7962. Typ: AFG
- HUDEC, J. - ŠTOFANIK, V. - VRETENÁR, V. - KUBIČÁR, Ľ. *Wireless device for monitoring the temperature-moisture regime in situ.* In ECTP2014- 20th European Conference on Thermophysical Properties, August 31-September 4, 2014, Porto : Book of Abstracts, p. 173. Typ: AFK
- KUBIČÁR, Ľ. - HUDEC, J. - FIDRÍKOVÁ, D. - DIEŠKA, P. *Monitoring of the temperature-moisture regime of St. Martin Cathedral in Bratislava.* In Proceedings of the International Conference Preventive and Planned Conservation, May 5-9, 2014, Monza, Mantova, Italy : Metodi e strumenti per la prevenzione e la manutenzione. - Milano : Nardini Editore, 2014, p. 191-200. ISBN 978-88-404-0317-5. Typ: AFC
- KUBIČÁR, Ľ. - HUDEC, J. - FIDRÍKOVÁ, D. - ŠTOFANIK, V. - DIEŠKA, P. - VRETENÁR, V. *Monitoring of the heat and moisture transport through walls of St. Martin cathedral tower in Bratislava.* In Geophysical Research Abstracts, 2014, vol. 16, p. 2695. ISSN 1607-7962. Typ: AFG
- KUBIČÁR, Ľ. - BARRUSIO, D.R. - HUDEC, J. - DIEŠKA, P. - VRETENÁR, V. *Accuracy analysis of the hot-ball method for measuring thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat.* In ECTP2014- 20th European Conference on Thermophysical Properties, August 31-September 4, 2014, Porto : Book of Abstracts, o-B1.31. Typ: AFG
- KUBIČÁR, Ľ. - FIDRÍKOVÁ, D. - HUDEC, J. - ŠTOFANIK, V. - VRETENÁR, V. - DIEŠKA, P. *Senzorický systém na monitorovanie tepelno-vlhkostného režimu kultúrnych pamiatok [Sensor system for monitoring of thermal moisture regime of cultural relics].* In Plynár-vodár-kúrenár+klimatizácia, 2014, roč. 12, č. 4, s. 38-41. ISSN 1335-9614. Typ: BDF
- KOUYATÉ, M. - FLORES-CUAUTLE, J.J.A. - SLENDERS, E. - SERMEUS, J. - VERSTRAETEN, B. - GARAY RAMIREZ, B.M.L. - SAN MARTIN MARTINEZ, E. - KUBIČÁR, Ľ. - VRETENÁR, V. - HUDEC, J. - GLORIEUX, C.

Study of thermophysical properties of silver nanofluids by ISS-HD, Hot Ball and IPPE techniques. In International Journal of Thermophysics, 2015, vol. 36, no. 10, p. 3211-3221. (0.963 - IF2014). (2015 - Current Contents). ISSN 0195-928X.

Typ: ADCA

- KUBIČÁR, L. - HUDEC, J. - FIDRÍKOVÁ, D. - DIEŠKA, P. - VITKOVIČ, M. *Effects in monitoring of the thermal-moisture regime of cultural objects located in defferent climate conditions.* In Advanced Materials Research. - Zurich : Trans. Tech. Publ., 2015, vol. 1126, pp. 93-98. ISSN 1022-6680. Typ: AFD

ADCA – Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch – impaktovaných

AFB – Publikované pozvané príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD – Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFG – Abstrakty príspevkov zo zahraničných konferencií

AFK – Postery zo zahraničných konferencií

BDF – Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

7 Účasť na konferenciách a študijných pobytoch

Konferencia: Thermophysics 2013, Podkylava

Dátum: 13.11. - 15.11. 2013

Typ prez.: ústna prezentácia

Predmet: Device for Monitoring the Temperature-moisture Regime of Cultural Objects Using Wireless Data Transmission

Konferencia: EGU, European Geoscience Union, Viedeň, Rakúsko

Dátum: 28.4.2014

Typ prez.: ústna prezentácia

Predmet: Wireless Device for Monitoring the Temperature-moisture Regime in Situ

Konferencia: PPC Preventive and Planed Conversation Conference Monza - Mantova, Taliansko

Dátum: 5.5. - 9.5. 2014

Typ prez.: poster

Predmet: Wireless Device for Monitoring the Temperature-moisture Regime in Situ a spoluautorstvo prezentacie Monitoring of the Temperature-moisture Regime of St. Martin Cathedral in Bratislava

Grant: Udelený grant od organizátora na cestovné náklady

Konferencia: ECTP European Conference on Thermophysical Properties, University of Porto, Portugalsko

Dátum: 31.08. - 04.09. 2014

Typ prez.: poster

Predmet: Wireless Device for Monitoring the Temperature-moisture Regime in Situ a spoluautorstvo prezentácie Accuracy Analysis of the Transient Hot-ball Method for Measuring Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity and Specific Heat

Konferencia: Thermophysics 2014, Podkylava

Dátum: 08.10. - 10.10. 2014

Typ prez.: ústna prezentácia

Predmet: Wireless Device for Monitoring the Temperature-moisture Regime in Situ

Konferencia: Thermophysics 2015, Terchová
Dátum: 14.10. - 16.10. 2015
Typ prez.: ústna prezentácia
Predmet: Analysis of Construction Variants of Hot-ball Sensor – Experiment and Simulation

Zahraničný študijný pobyt:

Navštívené pracovisko: Laboratory of Acoustics – Soft Matter and Biophysics
Department of Physics and Astronomy,
Katholieke Universiteit Leuven, Belgium

Pobyt: 1. 3. – 31. 8. 2015

Účel cesty: zahraničný študijný pobyt

Správa:

Počas tohto pobytu boli výskumné aktivity orientované hlavne na vývoj, výrobu a overenie funkčnosti a kvality jednej z nových konštrukčných variantov senzoru hot-ball (založenej na princípe flexibilných plošných spojov a osadenia aktívnych komponentov do dierky navrtanej do guľôčky – tela senzoru), čo priamo zapadá do predmetu môjho doktorandského štúdia. Počas tohto obdobia bolo skonštruovaných niekoľko senzorov, za odbornej a finančnej podpory zahraničného školiteľa z KU Leuven. Sensory boli použité pri:

- štúdiu transportu tepla v diamantových a fullerénových nanočasticových kvapalinách
- charakterizovaní tepelnoizolačných materiálov s veľmi nízkou tepelnou vodivosťou
- monitorovaní tuhnutia stavbárskych lepidiel

Pri práci bol priebežne aj vytváraný a zdokonaľovaný softvér pre spracovanie meraní.

Okrem týchto hlavných aktivít, som sa podieľal aj na montáži a softvérovom aj hardvérovom zdokonaľovaní prístroja na meranie tepelnej vodivosti metódou guarded hot-plate (chránenej horúcej platne), ktorý majú na KU Leuven, na meraní vzoriek týmto prístrojom a porovnaní s meraniami hot-ball metódou a tiež s impulznou prechodovou metódou, ktorú používame na SAV (prebieha po návrate z Belgicka). Ďalej som pracoval na konštrukcii zostavy s mikrometrickým posunom, pre vrtanie dier laserom, kde som sa naučil základy práce s laserom a optikou. Pobyt bol pre mňa veľmi prínosný aj v súvislosti so zdokonaľením anglického jazyka.

Študijný pobyt bol realizovaný za podpory z programu Erasmus+.