

Lukáš Molnár, Martin German-Sobek, Roman Cimbala

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Sledovanie vplyvu prívodných vodičov meracej aparatúry na meranie dielektrickej relaxačnej spektroskopie

Abstract. V súčasnosti existuje množstvo publikácií a odborných článkov zaoberajúcich sa skúmaním dielektrických vlastností izolačných materiálov. Táto publikácia sa zaoberá vplyvom prívodných vodičov a podmienok merania na výsledky merania dielektrických parametrov metódou dielektrickej relaxačnej spektroskopie.

Abstract. In the present there are a many publications and research articles dealing with the investigation of dielectric properties of insulating materials. This publication is aimed at influence of leading wires and measurement conditions on the measurement results of dielectric parameters by the method of dielectric relaxation spectroscopy [Monitoring the impact of leading wires on dielectric relaxation spectroscopy measurement].

Kľúčové slová: kapacita, stratový činiteľ, tienenie, dielektrická spektroskopie, Agilent

Keywords: capacity, dissipation factor, shielding, dielectric relaxation spectroscopy, Agilent

Úvod

Existuje rad metód, ktoré slúžia k diagnostike vlastností dielektrických materiálov. Jednou z nich je metóda dielektrickej relaxačnej spektroskopie (DRS), ktorej princíp je založený na skúmaní molekulárnej dynamiky polárnych alebo polarizovaných materiálov. Dielektrická spektroskopie zahŕňa metódy merané vo frekvenčnej oblasti, kde polarizačné javy sledujeme v striedavom elektrickom poli a na metódy merané v časovej oblasti, kde polarizačné javy sledujeme v jednosmernom elektrickom poli. Pomocou týchto metód je možné charakterizovať vlastnosti dielektrických materiálov [1].

Tienenie

Tienenie minimalizuje účinky elektrického šumu, ktorý pôsobí na testovacie (pripojovacie) vodiče [6]. Požiadavky na tienenie sú omnoho zložitejšie v spojovacích systémoch. V niektorých prípadoch môže byť nevyhnutné použiť metódu pokusu a omylu. Je to v dôsledku kombinácie typov signálov v spojovacom systéme (napr. vysoké frekvencie a nízke prúdy). Väčšie problémy s rušením môžu nastať pri dlhších spojovacích vodičoch. Spojovacie vodiče môžu taktiež prechádzať rôznymi spínacími zariadeniami, pričom na nich pôsobí rušenie z týchto zdrojov. Tienenie sa stáva rozhodujúcim faktorom pre zníženie vzájomného rušenia medzi spojovacími vodičmi [2].

Primárnymi zdrojmi rušenia sú blízke a susediace kanály modulov, a to o to viac, čím sú týmito kanálmi prenášané vysoké úrovne signálu alebo vysoké frekvencie. Rušenie sa transformuje do uzavretého kanála kapacitnou väzbou z iného kanála. Vzájomné rušenie je problémom v rôznych meraniach [2].

Jedným z ďalších zdrojov rušenia je rušenie z rádiových frekvencií. Okrem obvyklých zdrojov rušenia (žiarivky, mikroprocesory, okolie rozhlasových staníc, atď), samotné spínacie relé môže byť takýmto zdrojom rušenia pri spínaní vysokého napätia. Je to spôsobené natihnutím oblúka medzi kontaktmi pri spínaní vyššieho napätia. Práve mikroprocesory sú obzvlášť citlivé na túto formu rušenia. Kvalita samotného relé a jeho vnútorného tienenia, a súčasne vzájomná integrita všetkých systémov tienenia, musí byť dostatočná na zamedzenie rušivých vplyvov [2]. Ďalšie informácie o tienení, izoláciách rušenia a redukciách šumu sú uvedené v publikáciách [7],[8].

Pri vysokých frekvenciách je možné charakterizovať spínacie moduly pomocou zapojenia RC členov

(odporových, kapacitných). Tieto pozostávajú z odporu zdroja a celkovej kapacity modulov, káblov a testovaného zariadenia. Horná medzná frekvencia pre tento model závisí od usporiadania modulov, dĺžok ciest a ich indukčnosti a tiež impedancie. Táto frekvencia sa zvyčajne pohybuje okolo hodnoty 1 MHz. Nad touto hodnotou, začína väčšina modulov rezonovať z dôvodu strát spôsobených fázovým posunom [2].

Metóda DRS

Pre meranie vo frekvenčnej oblasti je používané striedavé napätie o rôznych frekvenciách, pričom sa sleduje a meria zodpovedajúca prúdová odozva. Meranie kapacity a stratového činiteľa "C, tgδ" v závislosti na frekvencii predstavuje klasické metódy slúžiace k hodnoteniu aktuálneho stavu izolačných systémov. Tieto metódy sú vykonávané pomocou mostíkových obvodov, ktoré sú zložené z kondenzátorov [3],[4].

Na skúšanú vzorku je pripojený kompenzačný kondenzátor, ktorý vykompenzuje kapacitnú zložku prúdu a tým je zabezpečené, že elektromer meria iba činný prúd. Presným meraním napätia a prúdu dostaneme impedanciu vzorky a fázový uhol medzi nimi, pomocou ktorého je možné zistiť reálnu a imaginárnu časť kapacity skúšaného objektu. Následne dostaneme stratový činiteľ, ktorý je odvodený vzťahom [5]:

$$(1) \bar{Z}(\omega) = \frac{\bar{U}(\omega)}{I(\omega)} = \frac{1}{j\omega C^*} = \frac{1}{j\omega C_0 [\varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega)]}$$

Teda stratový činiteľ vypočítame:

$$(2) \operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{C''}{C'}$$

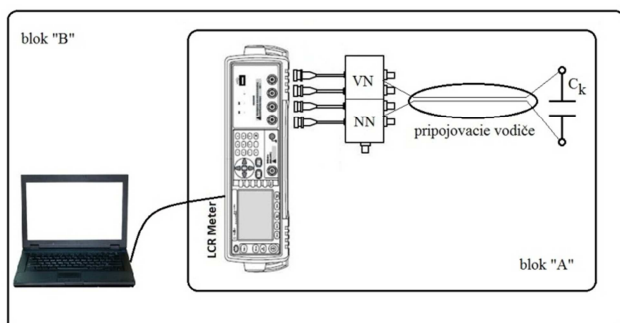
kde C' predstavuje reálnu časť a C'' imaginárnu časť kapacity testovanej vzorky [5].

Vo všeobecnosti tieto metódy poukazujú na nepriaznivé javy, ktoré vznikajú v izolačných systémoch. V závislosti na type testovaného zariadenia, nemôžu byť účinky zostarnutia merané len pri vysokých frekvenciách. Najmä pri skúšaní niektorých káblov sú mnohé javy zostarnutia viditeľné pri omnoho nižších frekvenciách [4]. Priebeh frekvenčných charakteristík je ovplyvnený faktormi akými sú teplota, vlhkosť, zostarnutie materiálu a jeho nečistoty [3].

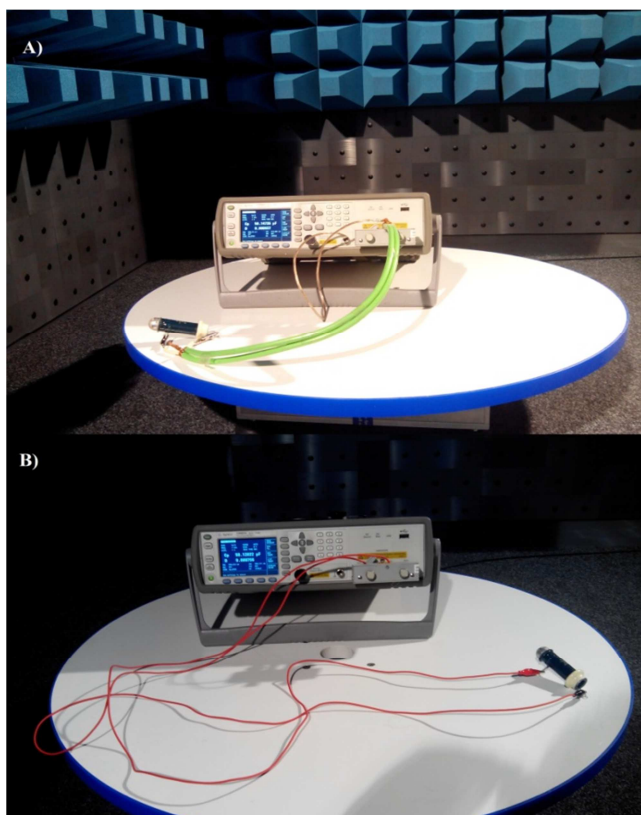
Experiment

Metódou dielektrickej relaxačnej spektroskopie vo frekvenčnej oblasti bol meraný vn kondenzátor, valcového typu so štítkovými údajmi TKo 2676/F 50/20 Up 5kV. Sledovanými veličinami boli kapacita C_k a stratový činiteľ $\text{tg}\delta$ kondenzátora v závislosti na frekvencii. Frekvenčný rozsah merania bol v rozmedzí od 20 Hz do 2 MHz. Daný experiment bol realizovaný pri troch, navzájom od seba rozličných podmienkach merania a to v laboratóriu, v sušiarni a v EMC komore. Na Obr.1 je zobrazené rozmiestnenie jednotlivých komponentov meracej aparatury v dvoch blokoch pre jednotlivé podmienky merania:

- meranie v laboratóriu – zahŕňa umiestnenie blokov "A" a "B" v laboratóriu v rámci laboratórných podmienok bez tieniaceho účinku,
- meranie v sušiarni – umiestnenie bloku "A" v uzemnenej sušiarni, blok "B" v laboratóriu,
- meranie v EMC komore – umiestnenie bloku "A" v EMC komore, blok "B" v laboratóriu.



Obr.1. Bloková schéma zapojenia



Obr.2. Meranie v EMC komore (blok "A"), A) pripojenie kondenzátora pomocou koaxiálnych vodičov, B) pripojenie kondenzátora pomocou vodičov so silikónovou izoláciou



Obr.3. Sušiareň (blok "A")

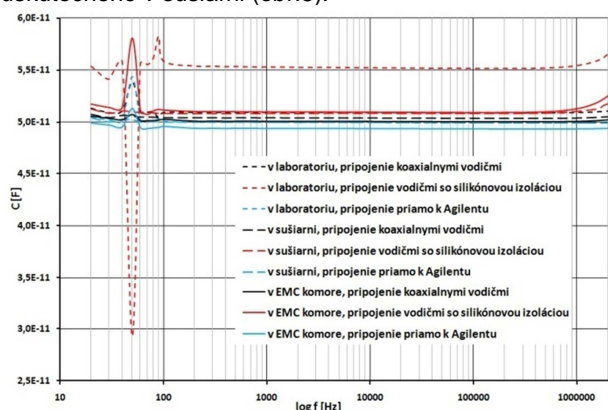
Pri všetkých týchto podmienkach bolo vykonané meranie pomocou LCR metra Agilent E4980A s nasledovnými spôsobmi pripojenia kondenzátora (Obr.1):

- pomocou vodičov so silikónovou izoláciou,
- pomocou koaxiálnych vodičov,
- pripojenia kondenzátora priamo na svorky LCR metra.

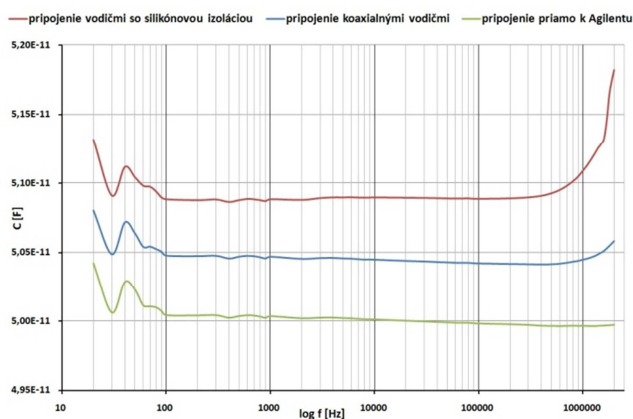
Vyhodnotenie experimentu

Na obr. 4 je znázornený priebeh kapacity kondenzátora v závislosti od frekvencie. Z obrázka jednoznačne vyplýva, že priebeh kriviek je najviac deformovaný v oblasti nízkych frekvencií od 20 Hz do 100 Hz a v oblasti vysokých frekvencií od 1 MHz do 2 MHz.

Naopak, v oblasti od 100 Hz do 1 MHz, nebol priebeh kriviek deformovaný. Najväčšiu nepresnosť merania, vzhľadom na fakt, že takmer všetky priebehy sa pohybujú okolo hodnoty kapacity kondenzátora uvedenej na štítku, t.j. 50 pC, vykazovala krivka nameraná v laboratóriu vodičmi so silikónovou izoláciou. Najväčšiu presnosť merania, teda najbližšie k hodnote kapacity kondenzátora 50 pC malo zapojenie kondenzátora C_k priamo na svorky LCR metra Agilent a to pri všetkých podmienkach merania. Vzhľadom na podmienky merania pri uvažovaní všetkých troch spôsoboch pripojenia (priamo k prístroju, koaxiálne vodiče a vodiče so silikónovou izoláciou) vykazovalo najväčšiu presnosť meranie v EMC komore, nasledovalo meranie v sušiarni a najnižšiu presnosť malo meranie v laboratóriu. Avšak, pre detailnejšie skúmanie oblastí nižších frekvencií do 100 Hz a vyšších frekvencií nad 1 MHz, nemôžu byť sledované krivky závislosti (koaxiálnych vodičov a vodičov so silikónovou izoláciou) pri meraní v EMC komore, z dôvodu ich značných deformácií v týchto oblastiach. Preto, pre popis týchto oblastí bolo vybrané meranie uskutočnené v sušiarni (obr.5).



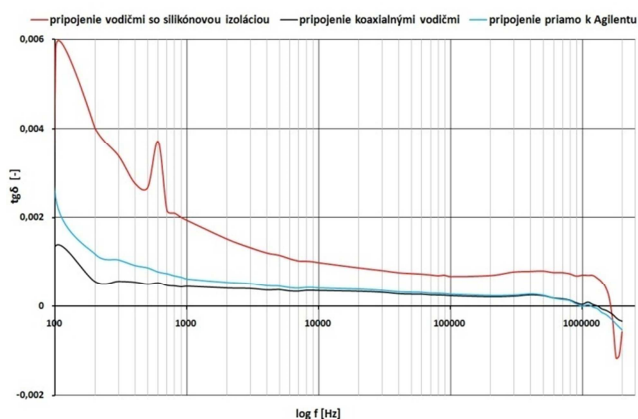
Obr.4. Frekvenčná závislosť kapacity kondenzátora od spôsobu pripojenia a podmienok merania



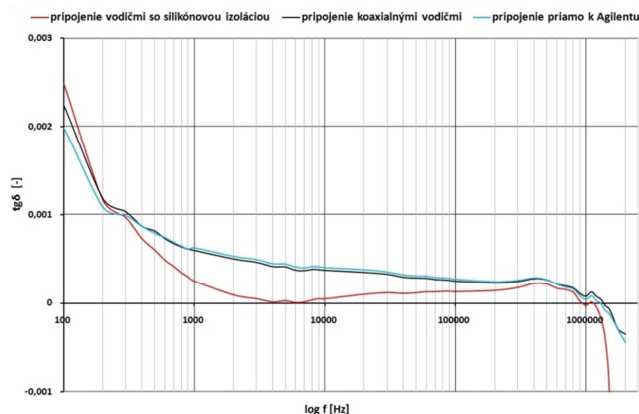
Obr.5. Frekvenčná závislosť kapacity kondenzátora pre meranie uskutočnené v sušiarňi

Na obr.5 sú zobrazené tri priebehy charakterizujúce zapojenia kondenzátora k prístroju, pričom rozdiel medzi nimi je hodnotovo malý, približne len 0,5 pC. V rámci prívodných vodičov je koaxiálny vodič presnejší než vodič so silikónovou izoláciou. V oblasti nízkych frekvencií do 100 Hz, vykazujú všetky typy charakteristiky približne rovnaké správanie, a to aj pri meraní kedy sú zapojené k LCR metru Agilent len prívodné vodiče bez kondenzátora. Jedným z dôvodov mohol byť vplyv elektromagnetického rušenia siete, pri frekvenciách blízkych 50 Hz, kedy vrchol kriviek nadobúda maximum.

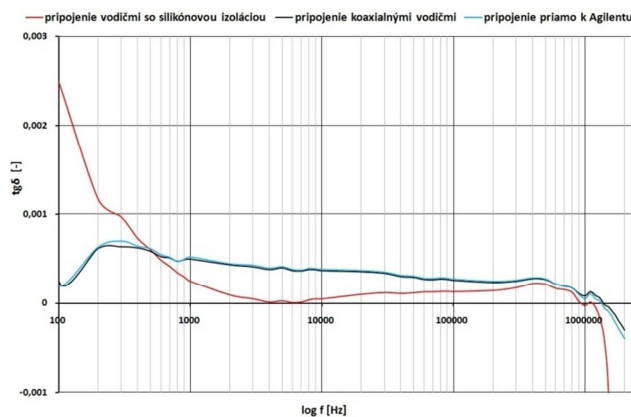
Oblasť od 100 Hz do 1 MHz je oblasťou približne rovnakého správania charakteristík, s približne konštantnými hodnotami. V oblasti vyšších frekvencií nad 1 MHz už nie je správanie kriviek jednotlivých spôsobov pripojenia kondenzátora rovnaké, skôr navzájom rozdielne. Zatiaľ čo správanie sa charakteristiky pripojenia kondenzátora priamo k prístroju ostáva naďalej nemenné (konštantná hodnota kapacity), ostatné dve charakteristiky pripojení pomocou vodičov menia svoje správanie. Môže to byť spôsobené vplyvom elektromagnetického rušenia na prívodné vodiče. V dôsledku tohto nežiaduceho javu, krivka vodiča so silikónovou izoláciou narastá už omnoho skôr, približne od frekvencie 500 kHz, pričom sa zvýši hodnota kapacity z pôvodnej konštantnej hodnoty približne o 1 pC, pri frekvencii 2 MHz. Na rozdiel od vodičov so silikónovou izoláciou, krivky koaxiálnych vodičov viditeľne menia svoje správanie až od frekvencie 1 MHz, pričom nárast je oproti vodičom so silikónovou izoláciou omnoho menší. V konečnom výsledku je preto koaxiálny kábel presnejší a menej náchylný k účinkom EMC rušenia. Je to dané vlastnosťami koaxiálneho kábla, najmä jeho tienením.



Obr.6. Frekvenčná závislosť stratového činiteľa kondenzátora pre meranie uskutočnené v laboratóriu



Obr.7. Frekvenčná závislosť stratového činiteľa kondenzátora pre meranie uskutočnené v sušiarňi



Obr.8. Frekvenčná závislosť stratového činiteľa kondenzátora pre meranie uskutočnené v EMC komore

Na obr.6, obr.7 a obr.8 je znázornená závislosť činiteľa dielektrických strát $\text{tg}\delta$ v závislosti od frekvencie, vzhľadom k podmienkam merania, pre všetky uvedené spôsoby pripojenia kondenzátora.

Pre všetky podmienky merania platí, že v oblastiach nízkych frekvencií t.j. do 100 Hz bol priebeh najviac deformovaný spomedzi celého meraného frekvenčného spektra určitým elektromagnetickým rušením, kde opäť maximum daného vrcholu bolo pri frekvencii siete 50 Hz. Porovnaním jednotlivých grafických závislostí v tejto frekvenčnej oblasti bolo zistené, že najhoršie ovplyvnenie týmto rušením bolo pri meraní v laboratóriu, ďalej nasledovalo meranie v EMC komore a najmenšie ovplyvnenie malo meranie uskutočnené v sušiarňi.

Vo frekvenčnej oblasti od 100 Hz do 1 MHz bolo správanie kriviek pri všetkých podmienkach merania odlišné, avšak pre všetky tieto podmienky platilo nasledovné. Charakteristika kriviek koaxiálnych vodičov a krivky pripojenia kondenzátora priamo k prístroju predstavovali rovnaký charakter správania s približne rovnakými hodnotami (v určitých frekvenčných pásmach nadobúdali takmer rovnaké hodnoty). Najväčšia odchýlka bola zaznamenaná vodičmi so silikónovou izoláciou. Pri vyšších frekvenciách nad 1 MHz, bolo pri všetkých troch podmienkach merania, zaznamenané určité anomálne správanie, kedy charakteristiky závislosti jednotlivých spôsobov pripojenia zasahovali do záporných hodnôt. Táto nepresnosť mohla byť spôsobená nesprávnym vyhodnotením dát na strane prístroja.

Diskusia

Cieľom tohto experimentu bolo pomocou dielektrickej relaxačnej spektroskopie zistiť správanie sa reálneho

dielektrika, v našom prípade vysokonapäťového kondenzátora, vzhľadom k druhu prívodných vodičov a od podmienok merania. Dôvod prečo bol použitý vysokonapäťový kondenzátor namiesto iného izolačného materiálu, napr. izolácie vn kábla používaného v praxi bol ten, že pri takomto izolačnom systéme by nebolo možné presne určiť vzťažnú hodnotu získanú meraním, tzv. porovnávaciu hodnotu, ktorá by nám ukázala rozdiel medzi použitím koaxiálneho vodiča a vodiča so silikónovou izoláciou. Zjednodušene povedané, ktorý z nich lepšie odráža reálne zmeny v danom frekvenčnom spektre. Východiskovú hodnotu preto predstavovalo zapojenie kondenzátora priamo k svorkám prístroja, čo vzhľadom ku konštrukcii kábla bolo obtiažne realizovateľné.

Podmienky merania boli rozdelené do troch skupín v závislosti od umiestnenia komponentov v bloku „A“ na obr.1. Patrilo tu meranie v laboratóriu, meranie v sušiarňi a meranie v EMC komore, čo odráža reálne možnosti merania v podmienkach nášho pracoviska.

Porovnanie správania sa koaxiálneho vodiča a vodiča so silikónovou izoláciou vyplynula z návrhu experimentu, pri ktorom je pomocou metódy DRS meraná zmena dielektrických parametrov vzoriek vysokonapäťových káblov vplyvom tepelného namáhania v sušiarňi pri teplotách dosahujúcich hodnotu až 110°C. Pre takéto meranie sú potrebné pripojovacie vodiče schopné odolávať týmto teplotám, čo vodiče so silikónovou izoláciou spĺňajú. V takomto prípade, budú vodiče so silikónovou izoláciou umiestnené z časti v laboratóriu, a z časti v sušiarňi. Daný experiment poukazuje v tomto smere na vnášanie nepresnosti do merania spôsobenej použitím vodičov so silikónovou izoláciou.

Záver

Príspevok poukazuje na deformácie kriviek jednotlivých frekvenčných charakteristík vysokonapäťového kondenzátora, hlavne v oblastiach nižších frekvencií od 20 Hz do 100 Hz a vyšších frekvencií od 1 MHz do 2 MHz, ale aj ovplyvnenie týchto charakteristík zo strany elektromagnetického rušenia meracej aparatury ako aj samotných pripojovacích vodičov.

Z príspevku vyplýva, že najideálnejší spôsob určovania dielektrických vlastností metódou dielektrickej relaxačnej spektroskopie vo frekvenčnej oblasti z hľadiska presnosti a najnižšieho vplyvu rušenia na dané meranie má zapojenie kondenzátora k prístroju pomocou koaxiálnych vodičov pri podmienkach merania v sušiarňi.

Výsledky tohto merania je možné aplikovať pri určovaní spôsobu merania dielektrických vlastností izolačných materiálov, vzhľadom od druhu prívodných vodičov a podmienok merania uvedených v tomto príspevku.

Literatúra

- [1] Farahani, M., Borsi, H., Gockenbach, E.: Dielectricspectroscopy in Time and Frequency Domain on Insulation System of High Voltage Rotating Machines. In 8th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD).Toulouse, France, 2004.
- [2] Keithley : Keithley Switching Handbook: A Guide to Signal Switching in Automated Test Systems, Third Edition. 1995.
- [3] Sulaiman, S.: Simulation modeling of polarization and depolarization current analysis for underground cable insulation. In: Power Engineering and Optimization Conference, Langkawi, 2013.
- [4] Zaengl, S. Walter: Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. Zurich: Swiss federal institute of technology, 2001
- [5] Neimanis, R., Eriksson, R.: Diagnosis of moisture in oil/paper distribution cables—Part I: Estimation of moisture content using frequency-domain spectroscopy. In: IEEE Transaction on Dielectric Electrical Insulation, Vol. 19, 2004.

- [6] Manuál k LCR metru Agilent. Dostupné na internete: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-4235EN.pdf>.
- [7] Morrison, Ralph. Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation. 3rd edition . John Wiley and Sons, 1986.
- [8] Ott, Henry W.Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. 2nd edition . John Wiley and Sons, 1988.

Podakovanie

„Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj, pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICOM pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií, kód ITMS:26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“ „Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.“



Autori: Lukáš Molnár, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: lukas.molnar@tuke.sk
 Martin German-Sobek, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: martin.german-sobek@tuke.sk
 Roman Cimbala, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: roman.cimbala@tuke.sk