

Roman Cimbala, Lukáš Kruželák, Peter Havran

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

Impedančná spektroskopia kvapalných izolačných materiálov

Abstrakt. Tento článok sa zaoberá meraním a porovnaním prúdových charakteristík kvapalného dielektrika vo frekvenčnej a v časovej oblasti. Teoretická časť obsahuje vlastnosti izolačných materiálov, popis metódy impedančnej spektroskopie vo frekvenčnej oblasti a problematiku IRC analýzy. Praktická časť obsahuje popis experimentu, použitú vzorku kvapalného dielektrika a analýzu nameraných výsledkov s grafickým znázornením hodnôt kapacity a stratového činiteľa v závislosti na frekvencii a hodnôt nabíjacieho prúdu v závislosti na čase.

Kľúčové slová: polarizácia dielektrika, kvapalné dielektrikum, kapacita, stratový činiteľ, nabíjací prúd.

Abstract. This paper deals with the measurement and comparison of the current characteristics of the liquid dielectric in the frequency and time domains. The theoretical part contains properties of insulating materials, a description of the impedance spectroscopy method in the frequency domain and IRC analysis. The practical part contains the experimental description, the used sample of the dielectric and the analysis of the measured results with graphical representation of the capacitance values and the loss factor on the frequency and values of the charging current over time.

Keywords: dielectric polarization, liquid dielectric, capacity, loss factor, charging current.

Úvod

Izolanty a dielektriká tvoria veľmi rozsiahlu skupinu materiálov, bez ktorých nie je možné prevádzkovať žiaden elektrotechnický systém. Prevádzková spoľahlivosť týchto zariadení závisí práve od ich kvality a životnosti. V praxi sa tieto materiály používajú kombináciou rôznych druhov izolantov. Príkladom kombinácie rôznych druhov izolantov je izolačný systém olej – papier.

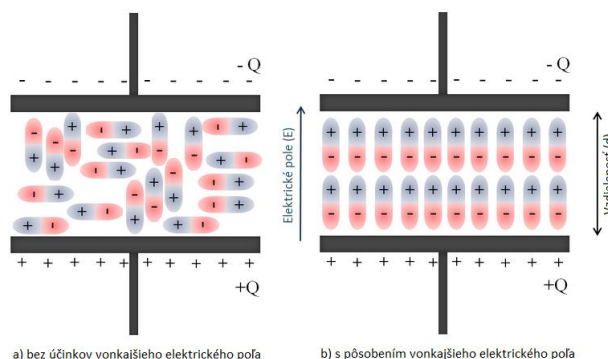
Izolačný olej tvorí jednu zo zložiek tejto sústavy, ktorá sa využíva v mnohých stroch a prístrojoch vnútri a vonku. V tejto sústave plní olej funkciu izolačného a zároveň chladiaceho média. Keďže olej je zároveň zdrojom plynných, kvapalných a pevných produktov vznikajúcich prevažne následkom oxidačného a tepelného starnutia izolačnej sústavy, vynakladá sa veľké úsilie na zlepšovanie jeho vlastností [1].

Polarizácia dielektrika

Proces, pri ktorom dochádza k zmene usporiadania elektrických nábojov v dielektriku pôsobením vonkajšieho elektrického poľa sa nazýva polarizácia dielektrika. Následkom tohto procesu sa v dielektriku vytvárajú elektrické dipóly. Elektrický dipól je dvojica elektrických nábojov rovnakej veľkosti s opačným znamienkom o určitej vzdialenosti medzi nimi. Každý elektrický dipól má svoj elektrický dipólový moment, ktorý charakterizuje mieru veľkosti elektrického dipólu.

Vplyv silových účinkov vonkajšieho a vnútorného elektrického poľa zapríčiňuje vysúvanie elektrických nábojov dielektrika z ich pôvodných rovnovážnych polôh. Po priložení elektrického poľa sa v látke, ktorá obsahuje dipólové molekuly orientované v smere poľa, vytvárajú indukované dipóly vzájomným vysunutím ťažísk opačných nábojov z pôvodných rovnovážnych polôh. Mierou tohto procesu je elektrická polarizovateľnosť [2].

Elektrická polarizovateľnosť je hlavnou fyzikálnou vlastnosťou dielektrika. Makroskopickým parametrom elektrickej polarizovateľnosti je relatívna permitivita ϵ_r a stratový činiteľ $\tan \delta$, s ktorými súvisia straty v dielektriku, starnutie izolantov a ich doba životnosti.



a) bez účinkov vonkajšieho elektrického poľa

b) s pôsobením vonkajšieho elektrického poľa

Obr.1. Orientácia dipólových momentov v dielektriku [1].

Odozvu viazaných elektrických nábojov na priložené elektrické pole sledujeme vo vonkajšom obvode prostredníctvom nejakej ľahko merateľnej veličiny – spravidla elektrického prúdu (pri jednosmerných meraniach) či impedancie (pri striedavých meraniach) [3].

Impedančná spektroskopia

Impedančná spektroskopia zaberá špeciálne miesto medzi mnohými modernými metódami používanými pre fyzikálne a chemické analýzy materiálov. Pomocou nej sú sledované medzimolekulárne interakcie a rôzne procesy, pretože poskytuje spojenie medzi vlastnosťami jednotlivých zložiek komplexného materiálu [4].

Komplexná impedancia

Impedancia je komplexná veličina, ktorá je definovaná vzťahom:

$$(1) \quad Z = \frac{u}{i}$$

kde: u je označované ako striedavý budiaci signál napätia a i predstavuje odozvu elektrického prúdu na skúmanej vzorke.

Na elektródy je najčastejšie privedený napätový monochromatický signál, ktorý má tvar:

$$(2) \quad u = u_0 \cdot \sin(\omega t)$$

Kde: u_0 predstavuje amplitúdu napätia a t je čas. Aplikáciou tohto napätia tečie skúmanou vzorkou prúd:

$$(3) \quad i = i_0 \cdot \sin(\omega t + \Theta)$$

pričom i_0 je amplitúda prúdu a Θ je fázový posun medzi prúdom a aplikovaným budiacim napätím.

Táto rovnica platí pre lineárnu odozvu, ktorú možno získať pri dostatočne malej vybranej hodnote u_0 .

Komplexný charakter impedancie môžeme zapísať ako súčet reálnej a imaginárnej zložky komplexnej impedancie, ktorá má tvar:

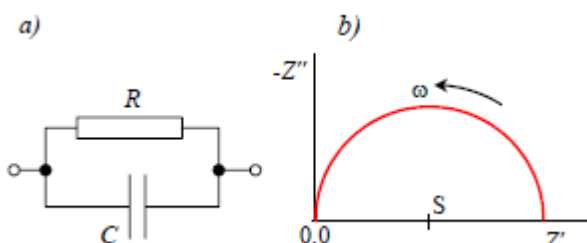
$$(4) \quad Z = Z' + iZ''$$

V impedančnej spektroskopii sa zvyčajne používa pri analýze nameraných údajov paralelný RC obvod, tzv. Voigtov člen, znázornený na Obr. 2a. Jeho impedancia má tvar:

$$(5) \quad Z = \frac{R(1 - i\omega\tau)}{1 + \omega^2\tau^2}$$

kde τ je relaxačný čas.

Graf impedancie Voigtovho člena v komplexnej rovine predstavuje polkružnica prechádzajúca počiatkom so stredom ležiacim na reálnej osi (Obr. 2b) [5].



Obr.2. Voigtov člen (a) a zobrazenie jeho impedancie v komplexnej rovine (b) [5].

Impedančná spektroskopia vo frekvenčnej oblasti

Princípom tejto metódy je pôsobenie striedavého napätia o rôznych frekvenciách na elektrický dipól v dielektriku a sledovanie jeho odozvy. Metódou impedančnej spektroskopie vo frekvenčnej oblasti sú polarizačné procesy realizované v striedavom elektrickom poli.

Dynamický prípad môže byť študovaný pomocou odozvy polarizácie harmonického (striedavého) elektrického poľa, čo vedie k frekvenčnej oblasti dielektrickej odozvy má tvar:

$$(6) \quad P(\omega) = \epsilon_0 \cdot \chi(\omega) \cdot E(\omega)$$

kde $\chi(\omega)$ je funkcia odozvy susceptibility alebo komplexná susceptibilita, definovaná ako Fourierova transformácia funkcie impulznej odozvy polarizácie $\phi_p(t)$.

$$(7) \quad \chi(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega) = \int_0^{\infty} \phi_p(t) \exp(i\omega t) dt$$

Reálne a imaginárne zložky funkcie odozvy susceptibility sú dané:

$$(8) \quad \chi'(\omega) = \int_0^{\infty} \phi_p(t) \cos(\omega t) dt$$

$$(9) \quad \chi''(\omega) = \int_0^{\infty} \phi_p(t) \sin(\omega t) dt$$

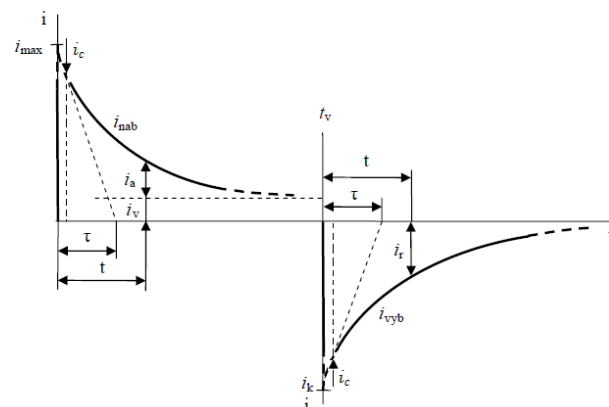
a stratový činiteľ $\tan \delta$:

$$(10) \quad \tan \delta(\omega) = \frac{\chi''(\omega)}{\chi'(\omega)} = \frac{\epsilon''(\omega) - 1}{\epsilon'(\omega) - 1}$$

Reálne zložky vzťahu (8) sú mierou kapacitného charakteru testovaného objektu a imaginárne zložky (9) predstavujú straty. Veľkosti oboch týchto zložiek sú závislé od frekvencie.

Izotermická relaxačná prúdová analýza

Izolačný systém je možné nahradiť za model zložený z odporov a kondenzátorov (Maxwell-Wagnerov model dielektrika). Tento model charakterizuje správanie sa systému v časovej, resp. frekvenčnej oblasti. V súlade s týmito poznatkami a polarizačnými javmi bola vyvinutá nová metóda, izotermická relaxačná prúdová analýza (IRC-analýza), ktorá môže byť využitá na skúmanie stavu elektrofyzikálnej štruktúry materiálu.



Obr.3. Odozva prúdu na vnútený napäťový impulz [6].

Obr. 3 vyjadruje priebeh prúdovej odozvy s aplikovaním jednosmerného napätia - nabíjací prúd (absorpčný) a jeho stratu - vybíjací prúd (resorpčný). Pripojenie jednosmerného napätia na dielektrikum má za následok vznik nabíjacieho prúdu, pre ktorý platí:

$$(11) \quad i_{nab}(t) = i_c(t) + i_a(t) + i_v(t)$$

kde: $i_c(t)$ je kapacitný prúd, ktorého hodnota je od počiatku priloženého napätia klesajúca. Tečie geometrickou kapacitou C_0 po dobu nabíjania $\tau = R_0 \cdot C_0$, kde R_0 činí odpor pri jednosmernom napätí; $i_a(t)$ je absorpčný prúd, inými slovami polarizačný prúd, ktorého priebeh je s časom klesajúci; $i_v(t)$ je vodivostný prúd, ktorý tečie odporom R_0 . Na začiatku sa tento prúd mení a neskôr dosahuje konštantnú hodnotu i_v .

Odpojením jednosmerného napätia dochádza k vybíjaniu materiálu následkom čoho vzniká vybíjací prúd, ktorý je daný súčtom $i_c(t)$ kapacitného a $i_r(t)$ resorpčného prúdu.

$$(12) \quad i_{vyb}(t) = i_c(t) + i_r(t)$$

Výsledný prúd tečúci dielektrikom je pokladaný za súčet elementárnych relaxačných prúdov, ktoré v čase exponenciálne klesajú. Je vyjadrený ako [6]:

$$(13) \quad i(t) = \frac{U}{R_0} + \sum_{i=1}^n I_{mi} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right)$$

Experiment

Meranie na vzorkách izolačných materiálov je neoddeliteľnou súčasťou skúmania, diagnostiky a navrhovania elektroenergetických systémov a zariadení.

Dôležitou súčasťou elektrizačnej sústavy sú aj izolačné oleje, ktoré plnia funkciu izolačného a chladiaceho média vo

výkonových transformátoroch, ako ochrana pred koróziou v olejových spínačoch a ako izolant vo vysokonapäťových priechodkách.

Použitá vzorka

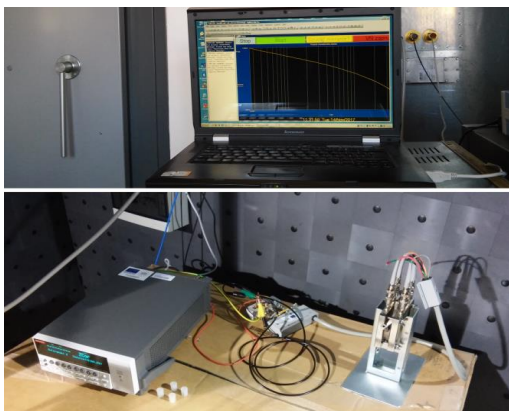
Samotné meranie bolo realizované na novej nepoškodenej vzorke izolačného oleja SHELL DIALA S4 ZX-1. Tieto produkty olejov sú založené na technológii GTL, ktorá premieňa zemný plyn na priezračne čistú kvapalinu v novovybudovanom závode v Katare.



Obr.4. Vzorka SHELL DIALA S4 ZX-1

Použitá meracia metóda

Meranie na vzorke izolačného oleja bolo vykonávané v odtienenej EMC komore skúmaním vo frekvenčnej a v časovej oblasti. Meranie vo frekvenčnej oblasti bolo realizované prístrojom IDAX-300, kde systém meracieho prístroja aplikoval na vzorku striedavé napätie o určitej frekvencii. Toto napätie vytvorilo vo vzorke prúdovú odozvu. Presným odmeraním napätia a prúdu je možné vypočítať celkovú impedanciu, z ktorej je ďalej vyjadrená kapacita a stratový činiteľ. Meranie v časovej oblasti bolo uskutočňované prístrojom KEITHLEY 6517B, pomocou ktorého boli odmerané nabíjacie prúdy v závislosti na čase.



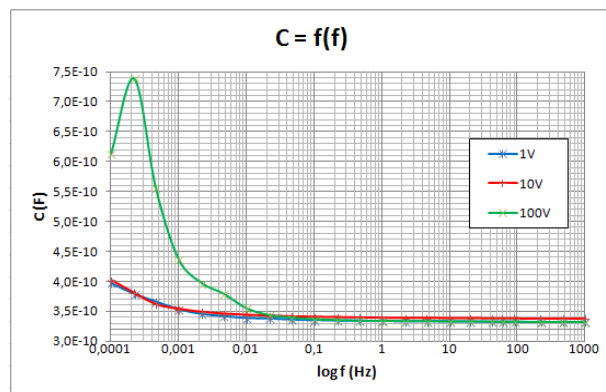
Obr.5. Meracie pracovisko

Analýza nameraných výsledkov

Namerané hodnoty kapacity a stratového činiteľa vzorky SHELL DIALA S4 ZX-1 boli odmerané meracím prístrojom IDAX-300, pomocou ktorého bolo meranie realizované s frekvenčným rozsahom od 0,1 mHz do 1 kHz. Meracím prístrojom KEITHLEY 6517B boli skúmané nabíjacie prúdy, ktoré systém generoval na vzorke v časových pásmach 10 s, 100 s a 1000 s.

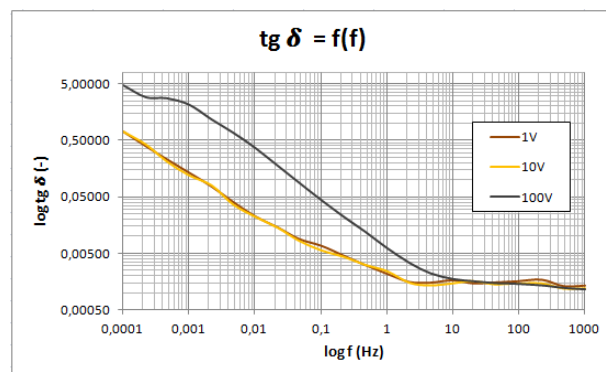
Na Obr. 6 sú znázornené grafické závislosti kapacity vo frekvenčnom pásme od 0,1 mHz do 1 kHz pri aplikovaných napätiach na vzorku o hodnote 1 V, 10 V a 100 V. Hodnoty kapacity nadobúdali klesajúci charakter so zvyšovaním frekvencie v pásme od 0,1 mHz do 0,1 Hz, kde pri porovnaní aplikovaných napätí vytvorila najväčšiu kapacitu na vzorke hodnota napätia 100 V. V tomto frekvenčnom pásme boli pri napätiach 1 V a 10 V zaznamenané približne rovnaké hodnoty kapacity. Vo frekvenčnom pásme od 0,1

Hz do 1 kHz nadobudla kapacita približne rovnaké hodnoty pre všetky aplikované napätia. materiálu.



Obr.6. Závislosť kapacity na frekvencii $C = f(f)$

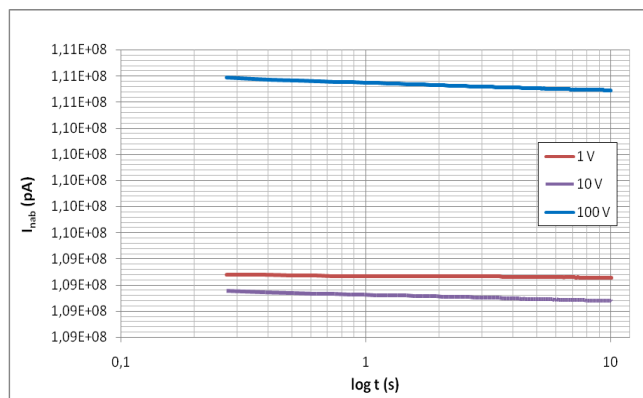
Závislosť stratového činiteľa (činiteľa dielektrických strát) na frekvencii v pásme od 0,1mHz do 1kHz pri priložených napätiach 1 V, 10 V a 100 V je znázornená na Obr. 7. Pri analyzovaní $\text{tg } \delta$ bola použitá logaritmická mierka kvôli lepšiemu vzájomnému porovnaniu jednotlivých charakteristík a taktiež kvôli správaniu sa jednotlivých dejov v určitých frekvenčných pásmach. Z Obr. 7 vyplýva, že hodnota $\text{tg } \delta$ klesá so zvyšovaním frekvencie. Pri porovnaní aplikovaných napätí nadobúdali $\text{tg } \delta$ najväčšie hodnoty pri napätí 100V. Hodnoty $\text{tg } \delta$ sú do frekvencie 1 Hz (nízke frekvencie) tvorené z väčšej časti jednosmernou vodivosťou a nad 1 Hz (stredné frekvencie) môžu byť hodnoty $\text{tg } \delta$ ovplyvňované polarizačnými dejmi.



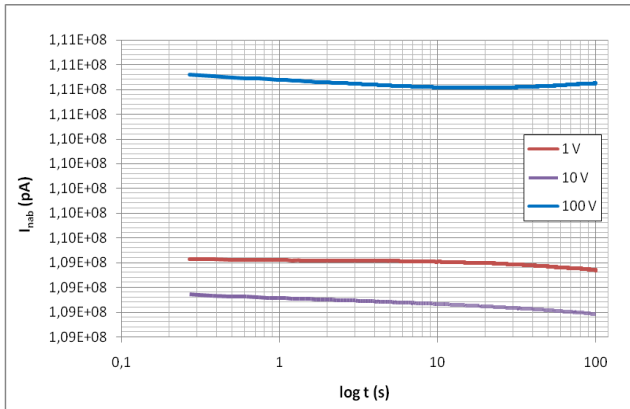
Obr.7. Závislosť kapacity na frekvencii $C = f(f)$

Izotermická relaxačná prúdová analýza

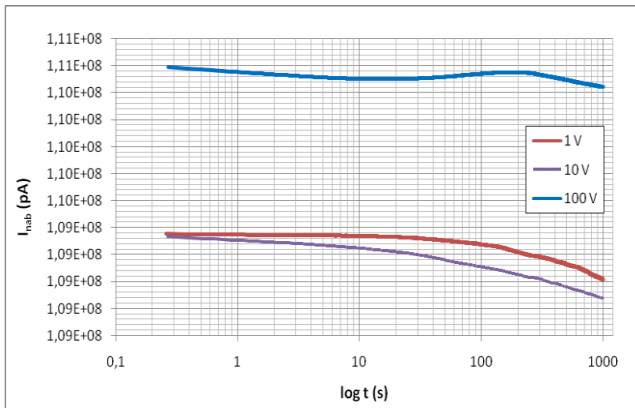
V tejto časti sú analyzované závislosti nabíjajúcich prúdov pri aplikovaných napätiach 1 V, 10 V a 100 V v časových pásmach 10 s (Obr. 8), 100 s (Obr. 9) a 1000 s (Obr. 10).



Obr.8. Závislosť nabíjacieho prúdu na čase (10s)



Obr.9. Závislosť nabíjacieho prúdu na čase (100s)



Obr.10. Závislosť nabíjacieho prúdu na čase (1000s)

Pri pohľade na priebehy nabíjajúcich prúdov sa zdá, že krivky sú lineárne, ale to nie je pravda. Krivky majú klesajúci charakter na čase ako je to na Obr. 3. Problémom je to, že pri porovnaní nabíjajúcich prúdov pri aplikovaných rôznych napätí došlo na osi y k veľkému rozsahu hodnôt nabíjajúcich prúdov.

Z grafických závislostí je vidieť, že najväčšie hodnoty nabíjajúcich prúdov na vzorke oleja boli pri napätí 100 V a to pri všetkých časových pásmach. Taktiež je zaujímavé, že nabíjacie prúdy pri napätí 1 V dosahovali väčšie hodnoty ako pri napätí 10 V vo všetkých časových pásmach. Najvyššie hodnoty nabíjacieho prúdu boli zaznamenané pri napätí 100 V s dobou nabíjania 100 s a najnižšie hodnoty nabíjacieho prúdu boli pri napätí 10 V s dobou nabíjania 1000 s, čo je samozrejmé, pretože pri dlhšej dobe nabíjania klesá nabíjací prúd do nižších hodnôt. Charakter nabíjajúcich prúdov závisí taktiež aj od doby nabíjania dielektrika.

Záver

Cieľom experimentu bolo skúmanie napäťových závislostí čistého izolačného oleja Shell DIALA S4 ZX-1 prostredníctvom merania diagnostických parametrov pri aplikovaní rôznych napätí na vzorku. Merania vo frekvenčnej oblasti obsahovali sledovanie hodnôt kapacity C a stratového činiteľa $\tan \delta$ meracím prístrojom IDAX 300. V časovej oblasti boli skúmané nabíjacie prúdy pomocou meracieho prístroja KEITHLEY 6517B.

Z grafických závislostí je možné konštatovať, že hodnoty kapacity nadobúdali klesajúci charakter so zvyšovaním frekvencie v pásme od 0,1 mHz do 0,1 Hz, kde pri porovnaní aplikovaných napätí vytvorila najväčšiu kapacitu na vzorke hodnota napätia 100 V. V tomto frekvenčnom pásme boli pri napätí 1 V a 10 V zaznamenané približne rovnaké hodnoty kapacity. V pásme od 0,1 Hz do 1 kHz nadobudla kapacita približne rovnaké hodnoty pre všetky aplikované napätia. Čo sa týka

stratového činiteľa, jeho hodnoty klesali so zvyšovaním frekvencie pri všetkých aplikovaných napätíach. Pri porovnaní aplikovaných napätí nadobúdali $\tan \delta$ najväčšie hodnoty pri napätí 100 V. V oblasti nízkych frekvencií (0,1 mHz - 10 Hz) bolo zistené, že hodnoty stratového činiteľa sa zväčšujú so zvýšením aplikovaného napätia. Z grafických závislostí nabíjacieho prúdu na čase možno konštatovať, že najväčšie hodnoty nabíjajúcich prúdov boli pri napätí 100 V a to pri všetkých časových pásmach. Taktiež bolo zistené, že nabíjacie prúdy pri napätí 1 V dosahovali väčšie hodnoty ako pri napätí 10 V vo všetkých časových pásmach, čo by mohlo byť predmetom ďalšieho skúmania.

Literatúra

- [1] A. Pietriková, J. Banský. Základy inžinierstva materiálov. Košice: Elfa, s.r.o., 2007. 278 s. ISBN 80-8086-001-7.
- [2] K. Liederman et al. Dielektrická relaxačná spektroskopie. Ústav fyziky. FEKT VUT Brno. Inkubátor vedeckých tímov pro fyzikální elektroniku a nanotechnologie – CZ.1.07/2.3.00/09.0214.
- [3] Y. Feldman. Department of Applied Physics. Broad Band Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain. The Hebrew University of Jerusalem. Dostupné na internete: <<http://aph.huji.ac.il/people/Feldman/research.htm#>>.
- [4] M. Kubliň, R. Čička. Princípy modulárnej a impedančnej spektroskopie pri vyšetovaní štruktúrnych zmien a defektov neusporiadaných štruktúr. Dostupné na internete: <http://www.mtf.stuba.sk/docs/internetovy_casopis/2006/2/kubli_aha.pdf>.
- [5] R. Cimbala, P. Semančík. Tepelná degradácia kvapalných izolačných materiálov. Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice. 2016. 147 s. ISBN 978-80-553-2545-3.
- [6] D. K. Das-Gupta, P. C. N. Scarpa. Polarization and Dielectric Behavior of ac-aged Polyethylene. In IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. School of Electronic Engineering and Computer Systems, University of Wales, Bangor, UK. June 1996. 9 s. ISSN 1070-9878.

Podakovanie

Práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0438 a Ministerstvom školstva v rámci projektov VEGA č. 1/0340/18, a 2/0141/16 a projektu zo ŠF EÚ "Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a použitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky", ITMS 26220120055.

Autori:

Roman Cimbala, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: roman.cimbala@tuke.sk

Lukáš Kruželák, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: lukas.kruzelak@tuke.sk

Peter Havran, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: peter.havran2@student.tuke.sk