

Roman Cimbala, Lukáš Kruželák

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

Vplyv elektromagnetického rušenia na izotermickú relaxačnú prúdovú analýzu magnetických nanokvapalín

Abstrakt. Článok sa zaoberá magnetickými kvapalinami na báze transformátorového oleja ITO 100 a o správaní týchto kvapalín, pod vplyvom trvalého magnetického poľa reprezentovaného NdFeB magnetmi. Merania boli vykonané v anechoickej EMC komore a mimo komory pre porovnanie nameraných výsledkov. Hlavný cieľ bolo určiť, do akej miery sú merania ovplyvnené vonkajšími elektromagnetickými poľami, ktoré vytvárajú elektrické zariadenia. Článok prezentuje namerané výsledky a v závere sú tieto výsledky zhodnotené.

Kľúčové slová: anechoickej komore, magnetická kvapalina, elektromagnetické pole, transformátorový olej.

Abstract. These The article deals with magnetic ferrofluids based on the ITO 100 transformer oil and the behavior of these liquids under the influence of a permanent magnetic field represented by NdFeB magnets. The measurements were performed in an anechoic EMC chamber and outside the chamber to compare the measured results. The main objective was to determine the extent to which the measurements are affected by the external electromagnetic fields generated by the electrical equipment. The article presents the results and, in the end, these results are evaluated.

Keywords: anechoic chamber, magnetic fluid, electromagnetic field, transformer oil.

Úvod

Keďže elektroenergetické zariadenie potrebuje pre svoju činnosť a správnu funkčnosť vhodnú izoláciu, a preto sa začali v elektroenergetike hľadať nové izolačné materiály, ktoré by nahradili už používané izolačné systémy za účelom zlepšenia prevádzkyschopnosti a zníženia elektrických strát elektroenergetických zariadení. Takýmto materiálom sa zdajú byť magnetické kvapaliny, pri ktorých bolo hlavnou myšlienkou použiť tieto kvapaliny v izolačnom systéme transformátora kde by zabezpečovali chladiacu funkciu a zlepšili by odvod odpadového tepla, čo by znížilo elektrické straty [1]. Materiály používané v elektroenergetike ako aj magnetické kvapaliny podliehajú vplyvu starnutia, čo má za následok zhoršenie ich izolačných vlastností. Znižovanie elektrickej pevnosti vplyvom starnutia môže spôsobiť úplnú odstávku elektrického zariadenia. Vzhľadom na to, že spoľahlivá dodávka elektrickej energie je v elektroenergetike jedným z hlavných cieľov, bolo vyvinutých viacero diagnostických metód na zistenie stavu izolačných materiálov a týmto nástrojom následne odhadnúť dĺžku životnosti elektrických zariadení [2]. Magnetické kvapaliny sú kompozitné materiály, ktoré sa skladajú z viacerých zložiek a ich výroba je veľmi nákladná, preto je potrebné zistiť, či klasickými diagnostickými metódami vieme zistiť v akom stave sú tieto kvapaliny alebo či je potrebné vyvíjať nové špeciálne metódy a prístroje na ich diagnostiku [3].

Magnetické kvapaliny

Magnetické kvapaliny sú stabilné koloidné suspenzie jednodoménových magnetických nanočastíc, ktorých veľkosť je rádovo desiatky nanometrov. Magnetické nanočastice sú rovnomerne rozptýlené v celom objeme kvapalného média. Skladajú sa z troch základných zložiek, a to z magnetických častíc, ktoré udávajú kvapaline jej magnetické vlastnosti, z nosnej kvapaliny, ktorá zabezpečuje kvapalnú vlastnosť látky a z povrchovej aktívnej látky – surfaktantu, ktorá slúži na stabilizáciu magnetickej kvapaliny. Vlastnosti jednotlivých kvapalín sú ovplyvnené hlavne objemovým zastúpením magnetických častíc a ich veľkosťou. Ďalšie vlastnosti udáva aj použitá nosná kvapalina a spôsob stabilizácie [4] - [6].

Pre elektroenergetiku je predovšetkým potrebné, aby mali magnetické kvapaliny dostatočnú elektrickú pevnosť a primeranú viskozitu. Požadované vlastnosti sa dajú

dosiahnuť vhodným percentuálnym zastúpením jednotlivých zložiek, pri použití príliš veľkého percentuálneho zastúpenia magnetických nanočastíc (4% a viac), by výsledná kvapalina nemala dostatočne veľkú elektrickú pevnosť a ani požadovanú viskozitu. Z tohto dôvodu je potrebné nájsť správny pomer častíc tak, aby výsledná kvapalina mala požadované dielektrické a viskózne vlastnosti. Pre použitie v elektroenergetických zariadeniach sa používajú kvapaliny s hmotnostným zastúpením 0,5% až 2% [7].

Meranie nabíjajúcich a vybíjajúcich prúdov

Po pripojení jednosmerného elektrického poľa na dielektrikum začína týmto izolantom pretekať prúd, ktorého veľkosť závisí od veľkosti priloženého napätia a od doby, počas ktorej je toto napätie pripojené na dielektrikum. V dôsledku procesov, ktoré v izolácii vznikajú pôsobením jednosmerného elektrického poľa, je tento prúd ovplyvňovaný vodivostnými procesmi, ktoré charakterizujú zvodový prúd a polarizačnými procesmi, ktoré charakterizuje absorpčný prúd, ktorý preteká dielektrikom. Nabíjací prúd $i_n(t)$ pretekajúci dielektrikom môžeme vyjadriť zo vzťahu:

$$(1) \quad i_n(t) = i_c(t) + i_a(t) + i_v,$$

kde: $i_c(t)$ – kapacitná zložka prúdu $i_a(t)$ – absorpčná zložka prúdu i_v – vodivostná zložka prúdu

Od okamžiku, kedy bolo pripojené na vzorku napätie, kapacitná zložka prúdu $i_c(t)$ klesá podľa vzťahu:

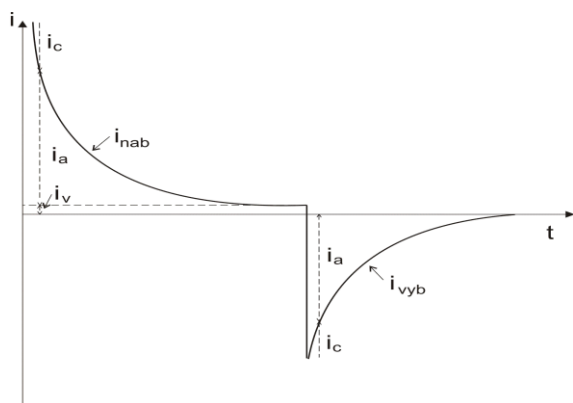
$$(2) \quad i_c(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

kde $\tau = R \cdot C_0$ je časová konštanta poklesu kapacitného prúdu [8].

Celkový prúd pretekajúci dielektrikom potom môžeme vyjadriť ako sumu všetkých elementárnych relaxačných prúdov exponenciálne klesajúcich v čase a je určený vzťahom:

$$(3) \quad i(t) = \frac{U}{R} + \sum_{i=1}^n I_{mi} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

kde: U – aplikované jednosmerné napätie, R – izolačný odpor v čase ∞ , I_{mi} – amplitúda i -teho elementárneho prúdu, τ – časová konštanta i -teho elementárneho prúdu, n – počet elementárnych prúdov.



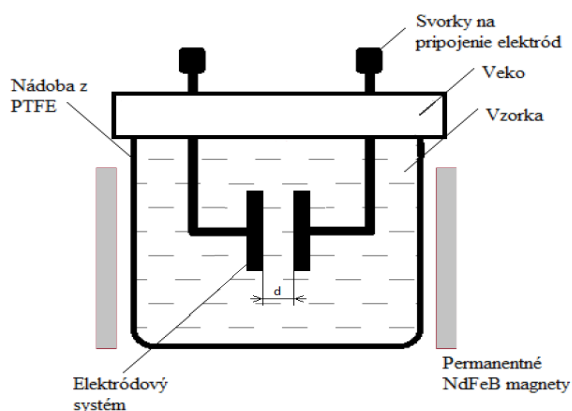
Obr.1. Časový priebeh nabíjacieho a vybíjacieho prúdu [6]

Nabíjacie a vybíjacie prúdy majú všeobecne monotónny rastúci či klesajúci priebeh v závislosti na čase. Z dôvodu absencie vodivostnej zložky prúdu sa práve pre účely dielektrických meraní najčastejšie využíva meranie vybíjajúcich prúdov [9], [10].

Zostavenie experimentálneho pracoviska a cieľ merania

Na Cieľom merania bolo zistenie nabíjajúcich a vybíjajúcich prúdov vybraných vzoriek v časovej oblasti pri izbovej teplote s orientáciou magnetického poľa $B=0$, $B \perp E$ a $B \parallel E$. Použitý prístroj je veľmi náchylný na rušenie, preto bolo meranie vykonané aj v bezdrazovej EMC komore. Komora obsahuje AC filter, ktorý zabráňuje prenikaniu vyšších harmonických zo siete, čo zabezpečilo hladší priebeh merania. Výrobca definoval jednotlivé vzorky veľkosťou magnetizácie. Vzorky mali označenie GAUSS 10 a GAUSS 50, koncentrácia častíc u jednotlivých vzoriek nepresiahla hodnotu 5%.

Jednotlivé vzorky boli merané najprv bez pôsobenia vonkajšieho magnetického poľa a potom aj s pôsobením vonkajšieho magnetického poľa, ktoré bolo vytvorené pomocou NdFeB magnetov. Veľkosť magnetickej indukcie použitých magnetov bola 40 mT. Na meranie vzoriek bol použitý systém valcových elektród, znázornený na obrázku 2. Priemer jednotlivých elektród je 20 mm a vzájomná vzdialenosť medzi elektródami bola 1 mm. Kvapalnú vzorku boli naliate do nádoby s približným objemom 75 ml.



Obr.2. Prípravok s elektródovým systémom na meranie vzoriek [8]

Na toto meranie bol použitý merací prístroj KEITHLEY K617 programovateľný elektrometer (obrázok 3) s meracím

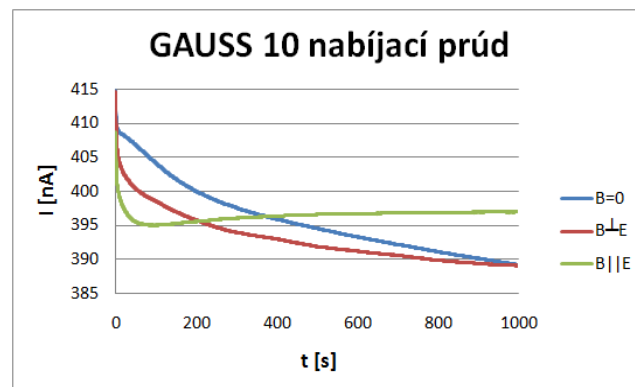
napätím 100V. Meranie bolo automatizované za pomoci PC programu Agilent Vee. Tento program riadil celé meranie a zaznamenával namerané hodnoty. Pri meraní boli spozorované rozdielne hodnoty nabíjajúcich a vybíjajúcich prúdov u tých istých vzoriek pri meraní v EMC komore a mimo nej. Merania boli vykonané s istým časovým odstupom, preto pri jednotlivých meraniach bola odlišná teplota prostredia a atmosférický tlak. Zmena týchto fyzikálnych veličín pravdepodobne zapríčinila odlišné hodnoty nabíjajúcich a vybíjajúcich prúdov pri tých istých vzorkách.



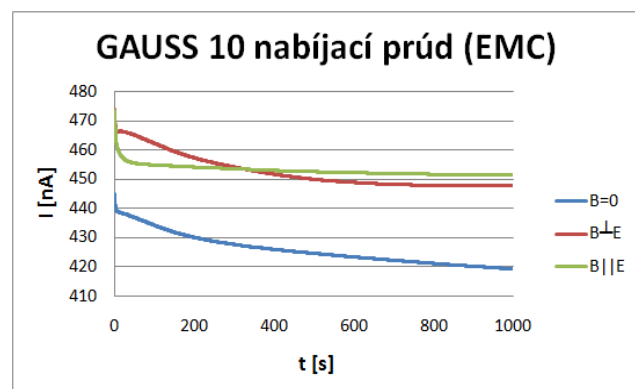
Obr.3. KEITHLEY K617 programovateľný elektrometer

Vyhodnotenie merania

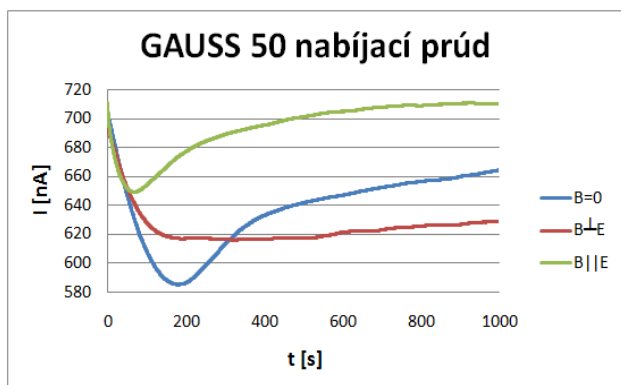
Pri meraní boli jednotlivé vzorky podrobené IRC analýze, pri ktorej boli merané nabíjacie a vybíjacie prúdy.



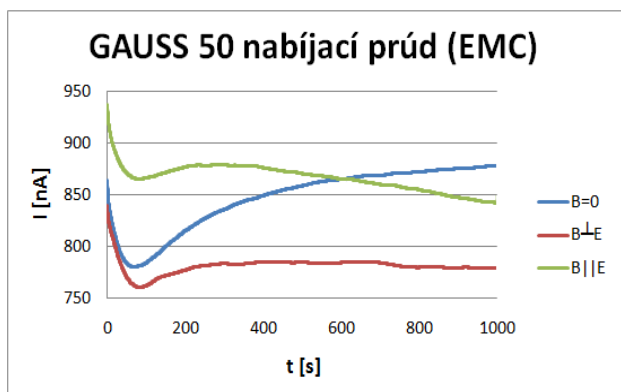
Obr.4. Závislosť nabíjacieho prúdu od času, vzorka GAUSS 10



Obr.5. Závislosť nabíjacieho prúdu od času, vzorka GAUSS 10, meranie v EMC komore



Obr.6. Závislosť nabíjacieho prúdu od času, vzorka GAUSS 50

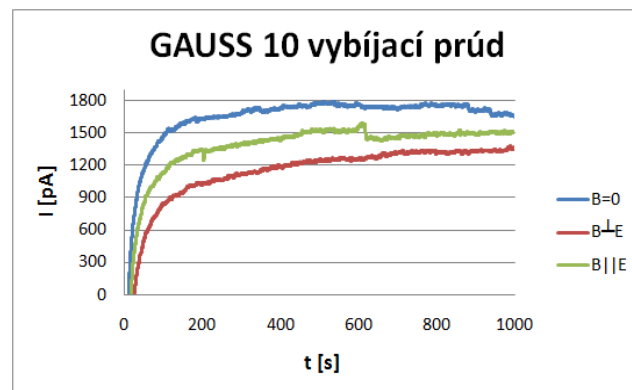


Obr.7. Závislosť nabíjacieho prúdu od času, vzorka GAUSS 50, meranie v EMC komore

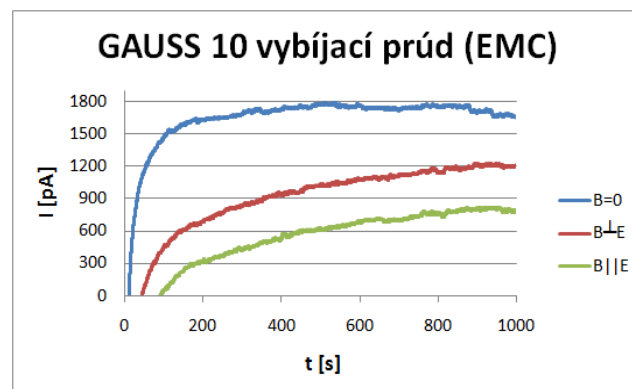
Na grafickom spracovaní nabíjacích prúdov je vidieť anomálie, ktoré vznikali pár desiatok sekúnd po začatí merania. Tieto anomálie vznikali pravdepodobne vplyvom magnetoferézy a dielektroferézy. Počas merania sa vo vzorke začali vytvárať reťazce magnetických častíc, ktoré vznikli pôsobením magnetického a elektrického poľa. Pri formovaní magnetických častíc do klastrov sa objaví zvýšenie hodnoty vodivostného prúdu, ktorý je zapríčinený pohybom a následným formovaním magnetických častíc do mikroskopických reťazcov. Ďalším možným dôvodom vzniku týchto anomálií je neznámy stav použitých vzoriek.

Vzorky mohli byť degradované predchádzajúcimi experimentmi, a tým sa mohli uvoľniť slabšie väzby medzi surfaktantom a magnetickou časticou. To mohlo spôsobiť, že niektoré častice neboli stabilné a chovali sa ako kalové čiastočky v transformátorovom oleji. Vplyvom degradácie magnetickej kvapaliny sa uvoľnia reťazce surfaktantu, ktorý zhoršil kvalitu nosnej kvapaliny a tým celkové dielektrické vlastnosti magnetickej kvapaliny. Pri grafickom spracovaní výsledkov je zároveň viditeľný vplyv magnetodielektrickej anizotropie u oboch vzoriek. Vplyvom magnetického poľa, sa magnetické nanočastice usporiadajú do reťazcov, ktoré sú orientované v smere siločiar magnetickej indukcie B . Pri orientácii magnetického poľa $B=0$ a $B \parallel E$ sa magnetické častice a reťazce dokážu ľahšie polarizovať v elektrickom poli. Pri $B \perp E$ je vplyvom magnetodielektrickej anizotropie zhoršená schopnosť reťazcov polarizovať sa v smere elektrického poľa. U vzorky s označením GAUSS 50 sa tieto rozdiely v nabíjacích prúdoch vplyvom magnetodielektrickej anizotropie prejavili výraznejšie než u vzorky GAUSS 10. Vyššia koncentrácia častíc u vzorky GAUSS 50 spôsobila výraznejší vplyv magnetodielektrickej anizotropie a vyššie hodnoty nabíjacích prúdov. Porovnaním výsledkov merania z EMC komory a mimo nej boli pozorované rozdielne krivky nabíjacích prúdov pri tých istých vzorkách. Rozdielne krivky sú pozorované u vzorky

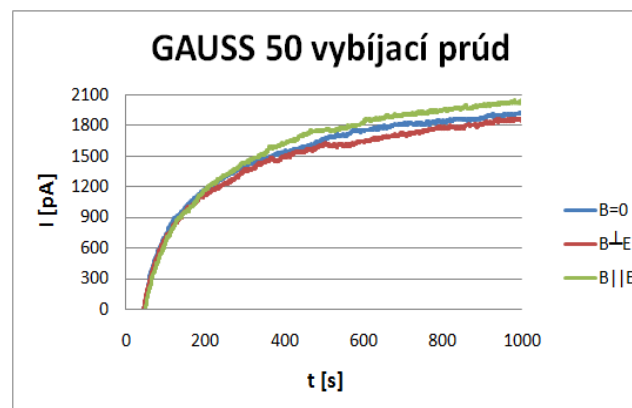
GAUSS 10 pri meraní v EMC komore s pôsobiacim vonkajším magnetickým poľom. Hodnoty nabíjacích prúdov pri $B \parallel E$ a $B \perp E$ sú oveľa vyššie pri meraní v EMC komore než mimo nej. U vzorky GAUSS 50 sú taktiež pozorované rozdielne priebehy nabíjacích prúdov pri $B=0$, $B \parallel E$ a $B \perp E$. Najvýraznejší rozdiel u tejto vzorky je pri meraní v EMC komore s usporiadaním magnetického poľa $B \parallel E$. Tieto rozdiely boli pravdepodobne spôsobené vplyvom AC filtra na merací prístroj.



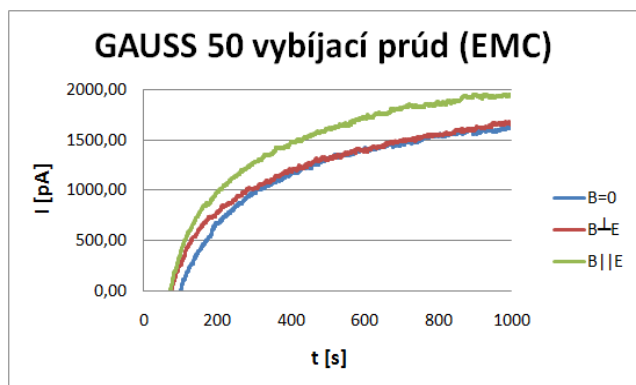
Obr.8. Závislosť vybíjacieho prúdu od času, vzorka GAUSS 10



Obr.9. Závislosť vybíjacieho prúdu od času, vzorka GAUSS 10, meranie v EMC komore



Obr.10. Závislosť vybíjacieho prúdu od času, vzorka GAUSS 50



Obr.11. Závislosť vybíjacieho prúdu od času, vzorka GAUSS 50, meranie v EMC komore

Pri meraní vybíjacích prúdov bolo možné vidieť značné rušenie, čo bolo spôsobené malou hodnotou vybíjacieho prúdu. Merane prúdy boli radovo v pikoampéroch, čo spôsobilo odchýlky pri meraní. Na grafických závislostiach je vidieť, že pri kolmom pôsobení magnetického poľa na elektrické pole je táto krivka plynulejšia, ako keď bola vzorka meraná bez magnetického poľa alebo paralelne s magnetickým poľom, čo bolo spôsobené vplyvom dielektromagnetickej anizotropie. Aj pri týchto závislostiach je pozorovaný rozdiel nameraných výsledkov v EMC komore a mimo nej. Rozdielna koncentrácia nanočastíc v jednotlivých vzorkách sa prejavila aj pri hodnotách vybíjacích prúdov. Pri vzorke GAUSS 50 bola vybíjacia krivka plynulejšia s exponenciálnym charakterom než u vzorky GAUSS 10. Zároveň je u tejto vzorky pozorovaný výraznejší vplyv magnetodielectrickej anizotropie, ktorá spôsobila menšie odchýlky vybíjacích prúdov pri $B=0$, $B\perp E$ a $B\parallel E$. U vzorky GAUSS 10 sú rozdiely v krivkách vybíjacích prúdov oveľa výraznejšie, krivky nemajú plynulý exponenciálny charakter, rozdiely vybíjacích prúdov pri $B=0$, $B\perp E$ a $B\parallel E$ sú oveľa výraznejšie ako u vzorky GAUSS 50. Porovnaním výsledkov merania z EMC komory a mimo nej boli pozorované rozdielne krivky vybíjacích prúdov pri tých istých vzorkách. Rozdielne krivky sú pozorované u vzorky GAUSS 10 pri meraní v EMC komore s pôsobiacim vonkajším magnetickým poľom. Hodnoty vybíjacích prúdov pri $B\parallel E$ a $B\perp E$ sú oveľa nižšie pri meraní v EMC komore než mimo nej. U vzorky GAUSS 50 sú taktiež pozorované rozdielne priebehy vybíjacích prúdov pri $B=0$, $B\parallel E$ a $B\perp E$. Najvýraznejší rozdiel u tejto vzorky je pri meraní v EMC komore s usporiadaním magnetického poľa $B\parallel E$. Pri meraní vybíjacích prúdov neboli pozorované výraznejšie anomálie ako tomu bolo pri meraní nabíjajúcich prúdov.

Záver

Tento článok sa zaoberá meraním nabíjajúcich a vybíjajúcich prúdov u dvoch vzoriek magnetických nanokvapalín. Jednotlivé vzorky boli podrobené IRC analýze v bezodrazovej EMC komore a mimo nej. Keďže prístroj KEITHLEY K617 je veľmi citlivý na rušenie z okolia, bolo potrebné zistiť ako veľmi sú namerané výsledky ovplyvnené vonkajším rušením. Aby sme eliminovali vonkajšie vplyvy, boli tie iste vzorky merané v bezodrazovej EMC komore, ktorej súčasťou je aj AC filter. Namerané výsledky jednotlivých vzoriek boli graficky spracované a vzorky boli medzi sebou porovnané. Pri porovnaní nameraných výsledkov boli pozorované rozdielne výsledky pri tých istých vzorkách. Tieto rozdiely boli spôsobené vplyvom EMC komory, ktorá zabránila rušeniu prístroja z okolia. Súčasťou bezodrazovej EMC komory je aj AC filter, ktorý zamedzil rušeniu prístroja z napájacej siete.

Namerané výsledky mohli byť ovplyvnené aj inými faktormi ako je rozdielny tlak, teplota a neznámy stav použitých vzoriek. Preto by bolo vhodné zaobstarať si nové vzorky, ktoré by sa podrobili urýchlenému starnutiu a v priebehu starnutia by na nich bola vykonaná IRC analýza.

Literatúra

- [1] V. Závistová. Magnetické častice a magnetické kvapaliny. Košice, 2011, s. 1-21.
- [2] A. M. Morega, M. Morega, L. Pâslaru-Dănescu, V. L. Stoica, F. Nouras, F. D. Stoian: A Novel, Ferrofluid-Cooled Transformer. Electromagnetic Field and Heat Transfer by Numerical Simulation, OPTIM 2010, 12th Int. Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 22-24 May 2010, DOI 10.1109/OPTIM.2010.5510528, ISBN 978-1-4244-7019-8, pp. 401-406, Brasov, Romania.
- [3] D. Andelman. In: From Magnetic Solids and Fluids to Organic Films and Polymers. World Scientific, New Jersey, 2009, s. 1-56.
- [4] C. Tangthieng, B.A. Finlayson, J.S. Maulbetsch, T. Cader: Heat transfer enhancement in ferrofluids subjected to steady magnetic field. Timisoara, 8th International Conference on Magnetic Fluids (ICMF), Timisoara, Romania, June 29-July 3, 1998, JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, pp 252-255, ISBN 0304-8853
- [5] R. Cimbala. Dependence of dissipation factor of magnetic fluids by temperature. Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach.
- [6] R. Cimbala. Starnutie vysokonapäťových izolačných systémov. Košice: Technická univerzita, EQUILIBRIA, s. r. o., 2007.: ISBN 978-80-8073-904-1
- [7] S.M. Snyder, T. Cader, B.A. Finlayson: Finite element model of magnetoconvection of a ferrofluid, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 262, 2003, pp.269-279.
- [8] S. Chaudhari, S. Patil, R. Zambare, S. Chakraborty: Exploration on Use of Ferrofluid in Power Transformers, IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Bangalore, India: 24-28 July 2012
- [9] V. Segal, K. Raj: An investigation of power transformer cooling with magnetic fluid. Indian J. Material Sci. Vol 5., December 1998
- [10] G.J. Hwang, M. Zahn, F.M. O'sullivan: Electron Scavenging by conductive nanoparticles in oil insulated power transformers. Cambridge, Electrostatics joint conference- paper 1.1: 2009

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 použitie 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