

POLARIZAČNÉ PROCESY V MAGNETICKÝCH KVAPALINÁCH

ROMAN CIMBALA, JOZEF KIRÁLY, MARTIN GERMAN-SOBEK, SAMUEL BUCKO, JURAJ KURIMSKÝ a JAROSLAV DŽMURA

*Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická Univerzita v Košiciach, Mäsiarska 74, 040 01 Košice
roman.cimbala@tuke.sk*

Došlo 18.8.14, prijaté 7.11.14.

Rukopis byl zařazen k tisku v rámci placené služby urychleného publikování.

Kľúčové slová: polarizácia, magnetická kvapalina, elektrické a magnetické pole, dielektrická spektroskopia, tepelné starnutie, koncentrácia nanočastíc

Obsah

1. Úvod
2. Chemická štruktúra nanokvapalín na báze transformátorového oleja
3. Magnetické kvapaliny v elektrickom a magnetickom poli
4. Dielektrická spektroskopia ako nástroj pre diagnostiku magnetických kvapalín
5. Experimentálna základňa pre dielektrickú spektroskopiu magnetických kvapalín
6. Záver

1. Úvod

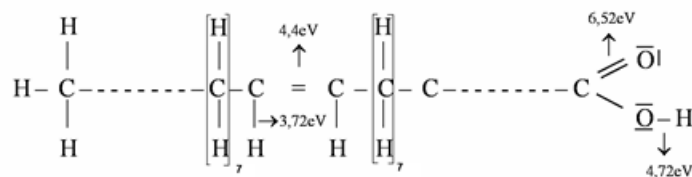
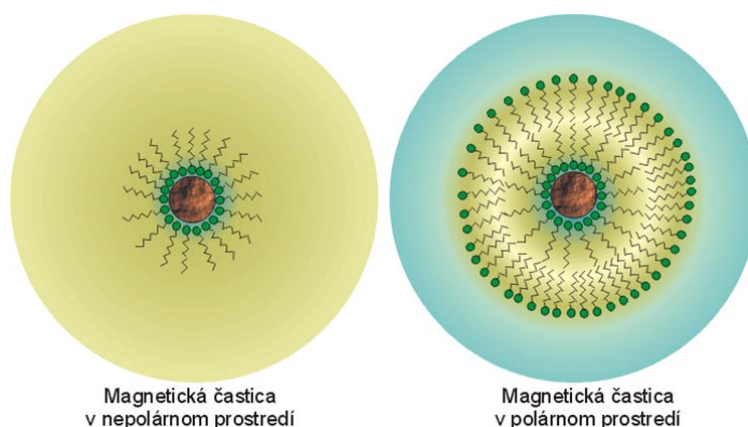
Požiadavky na zvyšovanie energetickej účinnosti priemyselných zariadení ponúkajú priestor na aplikáciu moderných nanomateriálov. V oblasti elektrotechniky a elektroenergetiky predstavujú kompozitné nanomateriály cestu zníženia dielektrických a tepelných strát týchto zariadení. V oblasti elektroenergetiky ide najmä o magnetické nanokvapaliny na báze inhibovaných transformátorových olejov a prírodných esterov. Tieto kvapaliny sú charakteristické kombináciou žiadaných vlastností štandardných transformátorových olejov a príspevku termomagnetického správania sa magnetických nanočastíc. Z pohľadu nevyhnutných podmienok pre správnu funkciu týchto kvapalín je nutné zachovať koloidnú stabilitu nanokvapalín po celú dobu ich prevádzky v zariadeniach. Táto stabilita je zabezpečená použitím solvátového obalu nanočastíc.

2. Chemická štruktúra nanokvapalín na báze transformátorového oleja

Magnetické nanokvapaliny môžu byť vyhotovené na základe použitia na rôznych kvapalných nosných médiách. V prípade použitia týchto kvapalín v priemysle sa najčastejšie jedná o kvapaliny na báze nafténických a parafinických minerálnych olejov. Použitie prírodných esterov je tiež možné, ale predovšetkým sa jedná o aplikácie s dôrazom kladeným na environmentálne hľadisko.

Ako bolo spomenuté, magnetické nanokvapaliny v elektrotechnike pozostávajú z nosného média (minerálny transformátorový olej obohatený o inhibitory), magnetických nanočastíc, ktoré sú nosičom magnetických vlastností a surfaktantu, teda povrchovo aktívnej látky, ktorá zabraňuje spájaniu magnetických dipólov v kvapaline. Percentuálne zastúpenie jednotlivých zložiek je dané koncentráciou nanočastíc, ktorá do značnej miery určuje výsledné vlastnosti takto vzniknutej kvapaliny. V prípade vysokej koncentrácie magnetických nanočastíc (4 % a viac) by boli žiadané elektrické vlastnosti značne degradované, a preto pre použitie v elektrotechnických a elektroenergetických zariadeniach dosahuje koncentrácia týchto častíc 0,5 % až 2 %. Okrem elektrických vlastností vplyva koncentrácia rovnako aj na viskozitu týchto kvapalín, ktorá je dôležitá z pohľadu impregnácie izolačného systému olej – papier. Magnetické nanočastice sú najčastejšie tvorené magnetitom (Fe_3O_4). Z pohľadu magnetického správania radíme magnetit medzi feromagnetiká, teda vlastnosťami sú tieto látky podobné feromagnetikám, ide však o látky na báze oxidov železa. Rozhodujúcim vplyvom na vlastnosti a správanie sa magnetitu je teplota. Do dosiahnutia Neelovej teploty si zachováva spontánnu magnetizáciu a správa sa ako feromagnet. Nad túto teplotu neovplyvňujú magnetické usporiadanie, teda správa sa ako paramagnet. Rozmer častíc použitých v týchto kvapalinách je v rozsahu 5 až 15 nm, teda z pohľadu magnetického správania môžeme hovoriť o magnetických dipóloch. Tvarovo ide vo všeobecnosti o sférické alebo ihličkovité častice. Ich tvar je predovšetkým závislý na spôsobe výroby. Vzhľadom na veľkosť častíc je pre tvarové posúdenie najvhodnejšie použiť TEM analýzu¹⁻³.

Úlohu surfaktantu, teda povrchovo aktívnej látky, zastáva najčastejšie kyselina olejová ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$). Je to organická kyselina zo skupiny vyšších olefinokarbónových kyselín. Keďže obsahuje skupinu COOH, patrí do skupiny karboxylových kyselín. Tieto kyseliny majú vlastnosti ovplyvnené dĺžkou tohto reťazca. V prípade kyseliny olejovej ide o stredne dlhý reťazec. Podstatnou vlastnosťou tejto kyseliny je, že jej molekuly sú amfifilné, teda pozostávajú z hydrofilnej a hydrofóbnej časti. Hydrofilná časť má polárny charakter a fyzikálne a chemicky interaguje

Obr. 1. Štruktúrny vzorec kyseliny olejovej a jej väzbové energie⁴Obr. 2. Solvátový obal magnetickej nanočastice v odlišnom prostredí⁵

s povrchom magnetitovej nanočastice. Tieto častice takto vytvárajú solvátový obal, ktorý zabraňuje vzájomnému zhukovaniu týchto nanočastíc. Štruktúrny vzorec spolu aj s hodnotami väzbových energií je uvedený na obr. 1. Je však nutné poznamenať, že z dôvodu zachovania vhodných dielektrických vlastností týchto kvapalín musí mať hydrofóbnu časť surfaktantu podobné dielektrické vlastnosti ako nosná kvapalina^{4,6,7}.

3. Magnetické kvapaliny v elektrickom a magnetickom poli

Keďže magnetické kvapaliny kombinujú vlastnosti štandardných dielektrík spolu s magnetickými vlastnosťami ferimagnetík, je potrebné venovať sa súčasnému vplyvu magnetického a elektrického poľa na tieto vzorky. V prípade dielektrickej spektroskopie, ktorá ako diagnostické metódy využíva merania vo frekvenčnej a časovej oblasti, môžeme uvažovať s pôsobením striedavého elektrického poľa s intenzitou E . Účinky pôsobenia striedavého elektrického poľa sa v magnetickej kvapaline prejavujú ako sily a mechanické namáhanie tlakového a ťahového charakteru. Ak uvažujeme v dielektriku o lokálnych diferen-

ciálnych zmenách permitivity a zmenách mernej hmotnosti magnetickej kvapaliny v dôsledku pôsobenia silného elektrického poľa, potom môžeme hovoriť o objemovej sile, ktorá vzniká nehomogenitou pôsobiaceho elektrického poľa a anizotropiou dielektrika. Z pohľadu polarizácie dochádza pri aplikovaní striedavého elektrického poľa v magnetických kvapalinách k polarizácii v nanometrických rozmeroch. Sila pôsobiaca na polarizované nanočastice je potom gradientnou^{8–11}.

V prípade súčasnej aplikácie elektrického a magnetického poľa dochádza nielen k pôsobeniu gradientných síl vyvolaných nehomogenitou pôsobiaceho el. poľa, ale aj k pôsobeniu vektora magnetickej indukcie v smere tohto aplikovaného poľa. Z pohľadu magnetodielektrickej anizotropie, teda rozptylu hodnôt dielektrických parametrov z dôvodu pôsobenia vonkajších polí, sú dôležité najmä nasledujúce usporiadania vektorov magnetickej indukcie – vektor intenzity elektrického poľa orientovaný v rovnakom smere ako vektor magnetickej indukcie, vektor intenzity elektrického poľa orientovaný kolmo na vektor magnetickej indukcie a v poslednom prípade s nulovou hodnotou vektora magnetickej indukcie. V prípade kolmého usporiadania pôsobiacich polí ich súčasným vplyvom dochádza za predpokladu rovnakých silových účinkov vyvolaných na

tieto častice k pohybu po špirále. Za paralelného pôsobenia externých polí dochádza k driftu častíc s konštantnou rýchlosťou^{8,12}.

Okrem popísaných síl pôsobiacich na kinematiku nanočastíc dochádza v prípade magnetických kvapalín, ktoré sú vystavené pôsobeniu magnetického a elektrického poľa, k vytváraniu reťazcov z nanočastíc, ktoré sa formujú do smeru siločiar. Jestvujú dva procesy, ktoré spôsobujú vytváranie a formovanie spomenutých reťazcov, a to magnetoforéza a dielektroforéza.

Magnetoforéza je mechanizmus vytvárajúci reťazce u nanočastíc vplyvom pôsobenia magnetického poľa. Hlavné princípy magnetoforézy je možné stručne objasniť pomocou niekoľkých rovníc. Pre potenciálnu energiu častice je možné napísať:

$$U = -\frac{(\chi_p - \chi_m)}{2\mu_0} VB^2 \quad (1)$$

kde V predstavuje objem častice, B je magnetická indukcia, μ_0 reprezentuje permeabilitu vákuu a χ_m a χ_p znamenajú magnetickú susceptibilitu okolitej látky a častice. Rovnicu pre magnetickú silu pôsobiacu na časticu je možné zapísať ako:

$$\vec{F} = -gradU = \frac{(\chi_p - \chi_m)}{2\mu_0} V(\vec{B} \cdot \nabla) \cdot \vec{B} \quad (2)$$

Pôsobiace nehomogénne magnetické pole vytvorí silu, ktorá môže pôsobiť na častice rozptýlené v kvapaline. Táto unášacia sila, ktorá na časticu pôsobí počas jej pohybu je:

$$\vec{F}_D = -6\pi\eta r \vec{v} \quad (3)$$

Vplyv viskozity prostredia je daný v tomto vzťahu ako η . Takto vyššie vyjadrené silové pôsobenie je priamo úmerné viskozite prostredia, v ktorom sa častica nachádza a jej polomeru r (cit. ²³). Rovnica pre magnetoforéznu rýchlosť môže byť zapísaná ako:

$$\vec{v} = \frac{2}{9} \frac{(\chi_p - \chi_m)}{\mu_0 \eta} r^2 (\vec{B} \cdot \nabla) \cdot \vec{B} \quad (4)$$

Táto rovnica vyjadruje, že rýchlosť častice je priamo úmerná rozdielu magnetických susceptibilit častice a prostredia, ktoré časticu obklopuje²⁴. Vo všeobecnosti je možné magnetoforézu rozdeliť na dva druhy. Kladná magnetoforéza sa objavuje v prípade, ak je permeabilita okolia (v našom prípade nosná kvapalina) menšia ako permeabilita častice. V takomto prípade sú častice priťahované k lokálnemu maximu nehomogénneho poľa a odpudzované od minima. Pre prípad, kedy je permeabilita okolia vyššia ako permeabilita častíc, hovoríme o magnetoforéze zápornej²⁵.

Zatiaľ čo magnetoforéza sa vyskytuje pri pôsobení magnetického poľa, dielektroforéza je javom vyskytujúcom sa pri pôsobení elektrického poľa. Opäť je možné

tento jav jednoducho popísať ako silu, ktorá pôsobí na časticu, avšak táto častica sa nachádza v nehomogénnom elektrickom poli. Toto pole vytvára gradient, ktorý spôsobuje migráciu dipólových častíc. Tu je potrebné poznamenať, že častice musia byť dipólmi, ale nemusia mať náboj. Stupeň dielektroforézy a teda rýchlosť migrácie častíc je závislá na veľkosti a tvare častice, vlastnostiach okolia, v ktorom sa častica nachádza, a na vlastnostiach pôsobiacего elektrického poľa²³. Vzťah pre silu pôsobiacu na časticu môže byť zapísaný ako:

$$F = \frac{\pi \epsilon_m \epsilon_0}{12} D^2 L \left[\frac{\alpha}{\alpha - 1} - f(\beta) \right]^{-1} \nabla E^2 \quad (5)$$

V tejto rovnici je permitivita okolia, v ktorom sa častica nachádza, reprezentovaná ϵ_m . Predpokladaný tvar častice pre tento model je predĺžená sferiáda s priemerom D a dĺžkou L . Pomer medzi relatívnou permitivitou častice a okolitou látkou je vyjadrený veličinou α . Geometria častice, teda pomer medzi šírkou a výškou častice je reprezentovaný vo vzťahu veličinou β (cit. ²³). Migrácia častíc, ktoré sú paralelne k unášacej sile je daná:

$$F = 3\pi\eta D v g(B) \quad (6)$$

Pre prípad, že častica je vodivá, je možné uvažovať s $\epsilon_p \rightarrow \infty$, potom aj $\alpha \rightarrow \infty$ a $\alpha/(\alpha-1) \rightarrow 1$. Pri skombinovaní rovníc (5) a (6), substitúciou $\alpha/(\alpha-1) \rightarrow 1$ a s uvažovaním limity, kde $\beta \rightarrow \infty$ je možné zapísať rýchlosť častice:

$$v = \lim_{\beta \rightarrow \infty} \frac{\epsilon_m \epsilon_0}{24\eta} L^2 \frac{\ln 2\beta - 0,5}{\ln 2\beta - 1} \nabla E^2 \quad (7)$$

Vplyv geometrie častice je len pri podmienke, že $\beta > 5$. Pre tento prípad musí byť splnená podmienka približne $\beta > 2$. Rýchlosť je priamo úmerná k štvorcu dĺžky častice²³.

Z pohľadu polarizačných procesov sú tieto dlhé reťazce podstatné najmä kvôli zmene polarizačných procesov, keďže veľkosť častice priamo ovplyvňuje jej polarizovateľnosť.

Posledným prípadom je vplyv tepelného poľa, ktoré v dôsledku poklesu magnetizácie podľa Langevinovej funkcie spôsobuje prúdenie chladnejšej kvapaliny do oblasti s vyššou teplotou za predpokladu prítomnosti magnetického poľa (statického, dynamického). Toto prúdenie je charakterizované ako termomagnetická konvekcia a predstavuje prostriedok zníženia pracovnej teploty zariadení pracujúcich s magnetickou kvapalinou ako chladiacim médiom. V niektorých prípadoch je možné dosiahnuť pri výkonových transformátoroch zníženie pracovnej teploty až do 10 % (cit. ¹³).

4. Dielektrická spektroskopia ako nástroj pre diagnostiku magnetických kvapalín

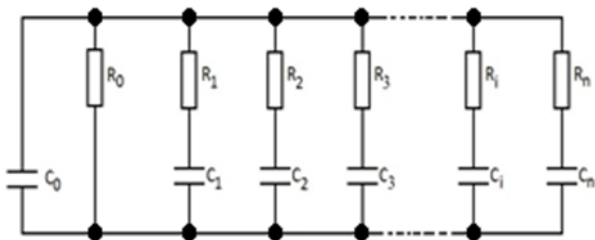
Jednou z nedeštruktívnych diagnostických metód v elektrotechnike a elektroenergetike je dielektrická spektroskopia, ktorá predstavuje súhrn diagnostických metód vo frekvenčnej a časovej oblasti. Z pohľadu procesov polarizácie je vhodnou metódou na posúdenie prebiehajúcich polarizácií s rozdielnym časom relaxácie. V prípade sledovania prúdovej odozvy v časovej oblasti je podstatné zachytiť polarizácie v rozmedzí časov 10^{-3} až 10^{+5} s. Zachytená prúdová odozva v čase pozostáva z troch zložiek – vodivostnej zložky, absorpčnej zložky a zložky prúdu geometrickej kapacity. Prúdom geometrickej kapacity môžeme označiť ekvivalentný prúd, ktorý je potrebný na nabitie kondenzátora tvoreného elektródovým systémom rovnakých rozmerov ako je meraná vzorka ale vo vákuu. Vzhľadom na krátku dobu zániku je možné túto zložku zanedbať. Vodivostná zložka prúdovej odozvy je ekvivalentnou k prúdu po nekonečne dlhom čase. Celkovým prúdom môžeme teda označiť sumu prúdov na sebe nezávislých polarizačných procesov prebiehajúcich v dielektriku^{14–16}.

$$i_c = U/R_i + \sum I_{mi} \exp(-t/\tau_i) \quad (8)$$

kde U je aplikované napätie na vzorku, R_i izolačný odpor po nekonečne dlhom čase, I_{mi} amplitúda i -tej zložky Debyeovho elementárneho prúdu a τ_i časová relaxačná konštanta danej zložky Debyeovho elementárneho prúdu. Na základe tejto rovnice môžeme uvažovať o náhradnom Maxwell-Wagnerovom modeli dielektrika (obr. 3), ktorý pozostáva z RC členov, ktoré reprezentujú jednotlivé polarizačné procesy s rozdielnym relaxačným časom (časovou konštantou). Uvažovaný model predstavuje základ pre pochopenie a interpretáciu rozdielných príspevkov jednotlivých častíc (domén) do celkového polarizačného prúdu dielektrika, z pohľadu diagnostiky nie je preto nutné striktno určovať jednotlivé prvky tohto náhradného modelu, ale posúdiť príspevok jednotlivých vetiev k celkovému polarizačnému procesu.

5. Experimentálna základňa pre dielektrickú spektroskopiu magnetických kvapalín

Pre skúmanie správania sa magnetických kvapalín pod vplyvom elektrického a magnetického poľa je dôležitá

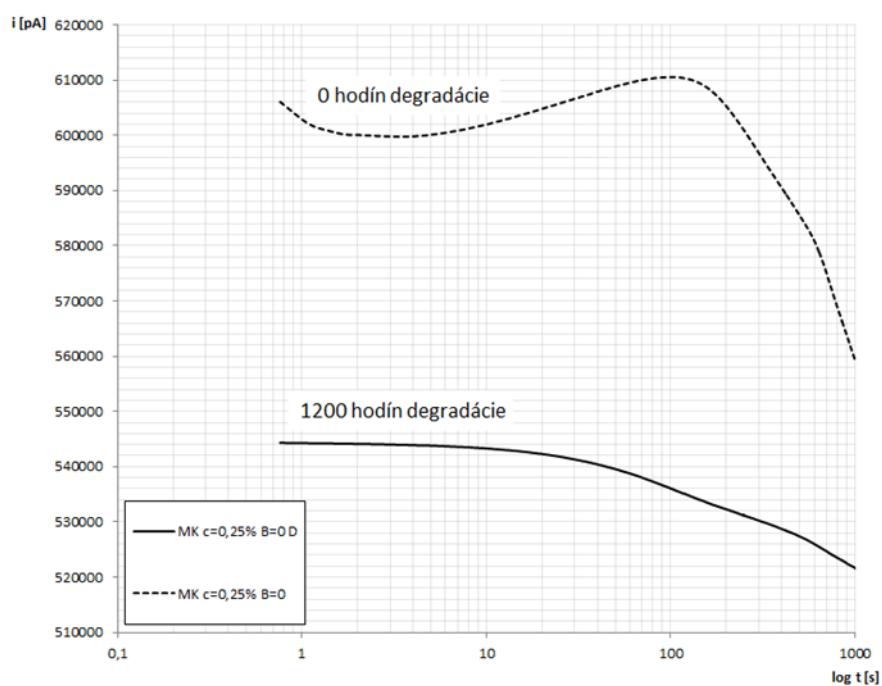


Obr. 3. Maxwell-Wagnerov náhradný model dielektrika¹⁷

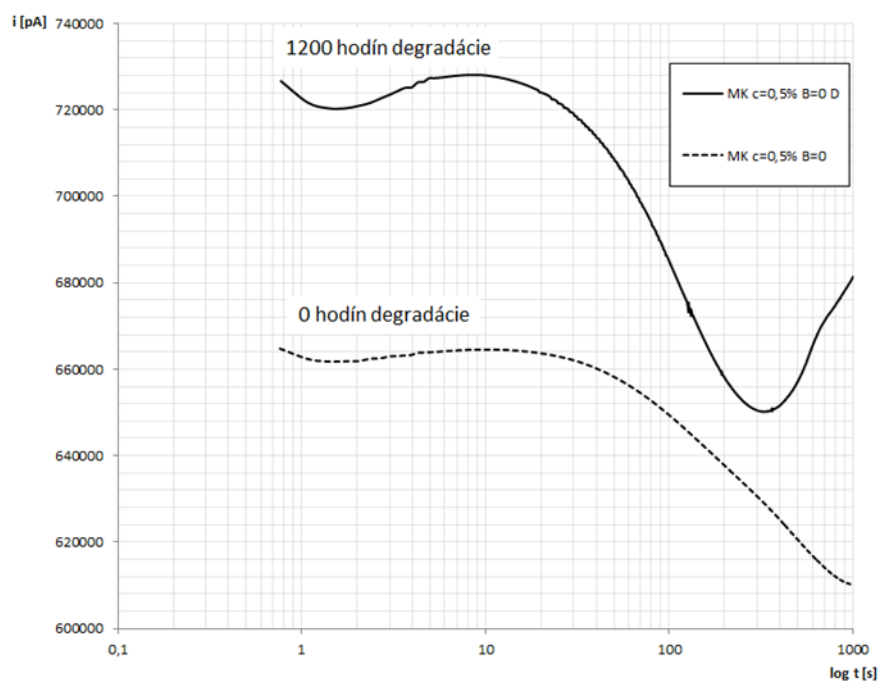
správna voľba koncentrácie vzoriek spolu s intenzitou elektrického a magnetického poľa. Pre experimenty boli zvolené magnetické kvapaliny s koncentraciami Fe_3O_4 nanočastíc 0,25 %, 0,5 % a 1 %. Solvátový obal nanočastíc bol tvorený kyselinou olejovou a ako nosné médium bol použitý inhibovaný transformátorový olej ITO100. Magnetická kvapalina bola vytvorená pomocou nanočastíc získaných zrážaním solí FeCl_2 a FeCl_3 . Následne boli pridaním NH_4OH získané Fe_3O_4 a H_2O . Teplota použitá pri procese precipitácie priamo ovplyvňuje stredný priemer častíc. Následne boli nanočastice upravené použitím kyseliny olejovej a rozptýlené v transformátorovom oleji. Meranie polarizačného prúdu prebiehalo v počiatočnom stave bez vplyvu tepelnej degradácie a následne po tepelnej degradácii v rozsahu 1200 hodín pri teplote 90°C . Elektródový systém bol tvorený cylindrickými elektródami s priemerom 20 mm a medzielektródovou vzdialenosťou 0,1 mm. Vzhľadom na nízke hodnoty meraných polarizačných prúdov boli merania realizované v elektricky tienenej komore z dôvodu zabránenia vzniku parazitných prúdov pri meraní. Statické magnetické pole bolo vytvorené dvoma NdFeB magnetmi s magnetickou indukciou v medzielektródovom priestore 40 mT. Meranie bolo realizované elektrometrom Keithley 6517B pri aplikovanom napätí 100 V. Intenzita aplikovaného elektrického poľa v medzielektródovom priestore bola teda 10^6 V m^{-1} . Laboratórne podmienky pri meraní boli $T = 295 \text{ K}$ a atmosférický tlak 1020 hPa. Aplikované napätie bolo zvolené na nižšej úrovni vzhľadom na malú elektródovú vzdialenosť a teda možnosť elektrického prierazu.

Na obr. 4 je zobrazená časová závislosť polarizačného prúdu pre vzorku magnetickej kvapaliny s koncentraciou nanočastíc $c = 0,25 \%$. Ako je zjavné, trend krivky je podobný trendu čistého inhibovaného transformátorového oleja¹⁸. Podobnosť kriviek je spôsobená najmä nízkou koncentraciou magnetických nanočastíc a teda aj surfaktantu. Keďže je transformátorový olej nepolárnou kvapalinou s relatívnou permitivitou rovnou približne 2,2 až 2,4, môžeme považovať zníženie polarizačného prúdu a teda kapacity za prejav celkového zníženia hodnoty reálnej a imaginárnej zložky komplexnej permitivity kvapaliny. Pri nízkych koncentráciách môže byť tento pokles interpretovaný rovnako znížením obsahu viazanej vody v transformátorovom oleji, čo má za následok pokles relatívnej permitivity a teda nabíjacieho prúdu. V prípade zvýšenia koncentrácie magnetických nanočastíc na hodnotu $c = 0,5 \%$ zostáva zachovaný trend polarizačného prúdu, dochádza však k anomálii spôsobenej rozpadom väzby solvátového obalu a magnetickej nanočastice. Tepelnou degradáciou dochádza k uvoľneniu väzieb kyseliny olejovej, ktorých väzbová energia je na úrovni 4,7 až 6,5 eV, ako je uvedené na obr. 1. Prekonanie týchto väzieb pri dlhodobom starnutí teda spôsobí odlúčenie dlhého C-H reťazca, ktorý ovplyvní štruktúru magnetickej kvapaliny a teda aj polarizačné procesy v nej prebiehajúce, ktoré sú reprezentované polarizačným prúdom.

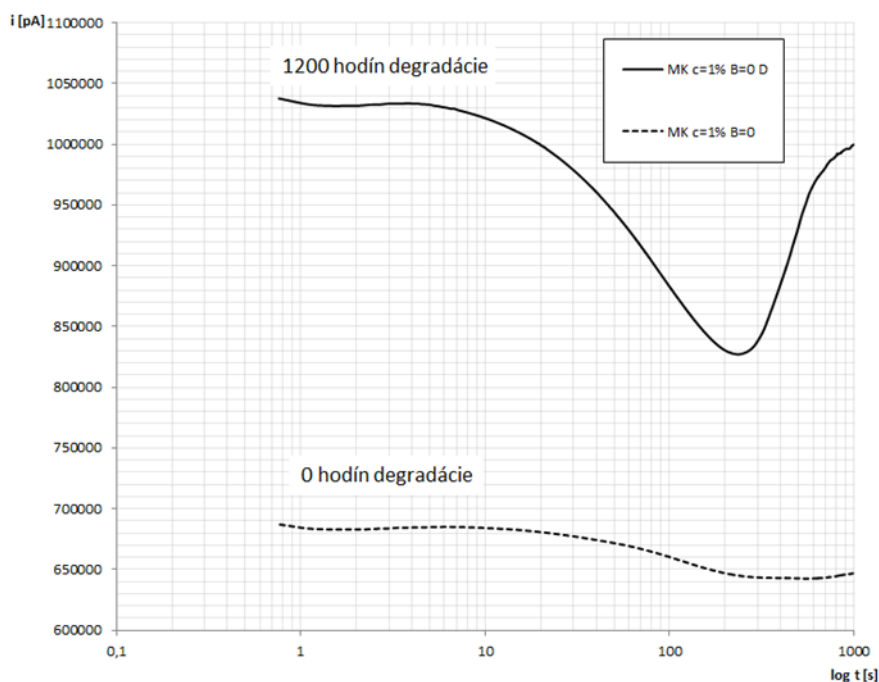
Na obr. 6 je uvedený priebeh prúdu pre kvapalinu s koncentraciou nanočastíc $c = 1 \%$. Ako v predošlom prí-



Obr. 4. Časová závislosť polarizačného prúdu vzorky magnetickej kvapaliny s $c = 0,25\%$ v počiatočnom a tepelne degradovanom stave, bez pôsobenia externého magnetického poľa



Obr. 5. Časová závislosť polarizačného prúdu vzorky magnetickej kvapaliny s $c = 0,5\%$ v počiatočnom a tepelne degradovanom stave, bez pôsobenia externého magnetického poľa

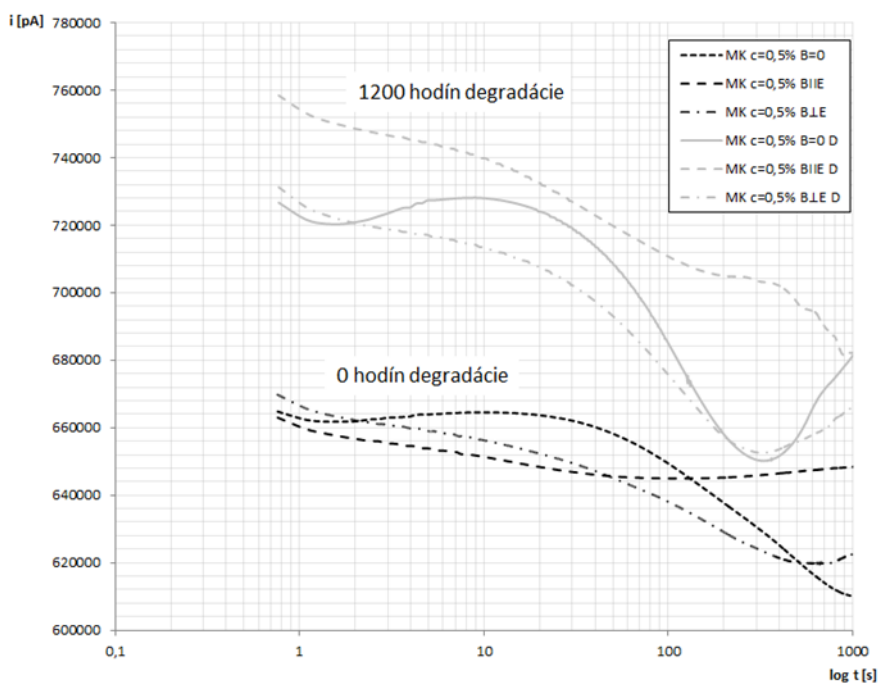


Obr. 6. Časová závislosť polarizačného prúdu vzorky magnetickej kvapaliny s $c = 1\%$ v počiatočnom a tepelne degradovanom stave, bez pôsobenia externého magnetického poľa

pade je trend rovnaký, avšak podstatnú zmenu vidíme v intervale hodnôt polarizačného prúdu. Predpokladáme, že elektrické pole pôsobiacie na nanočastice spôsobí dielektroforetickým javom vytvorenie usporiadaných reťazcov nanočastíc, ktorých polarizačný prúd predstavuje významný príspevok do celkového polarizačného prúdu meraného dielektrika. Aj napriek zníženiu obsahu viazaných molekúl vody v oleji, je v prípade vyšších koncentrácií magnetických kvapalín príspevok polarizačného prúdu spôsobený týmito časticami natoľko významný, že vplyv vody možno v týchto experimentoch zanedbať. Je však dôležité poznamenať, že v prípade dielektroforetického javu, a ako bude spomenuté v ďalšej kapitole aj magnetofoforetického javu, je významným faktorom pre vytváranie dlhých reťazcov čas. Možno predpokladať, že čas potrebný pre vytvorenie reťazca dlhého 100 až 500 nm je práve v lokálnom maxime časovej funkcie polarizačného prúdu. Pre koncentráciu 0,5 % je to teda cca oblasť 10 s a pre koncentráciu 1 % cca oblasť 4 s. Následným aplikovaním elektrického poľa dochádza k vytvoreniu natoľko dlhých reťazcov, že môže dochádzať k rozpadu týchto reťazcov do kratších a menších klastrov. Tieto klastre následne vytvárajú podľa opätovne vzrastajúceho trendu krivky polarizačného prúdu opätovne dlhé reťazce. Keďže merania boli realizované pri laboratórnej teplote $T = 295\text{ K}$, môžeme predpokladať relatívne zníženú pohyblivosť nanočastíc vplyvom Brownovho pohybu a viskozity kvapaliny pri

tejto teplote. V experimentoch¹⁹ realizovaných pri zvýšených teplotách dochádza k ovplyvneniu vytvárania týchto reťazcov v dôsledku udelenia vyššej energie celej energetickej sústave magnetickej kvapaliny a rovnako zmeny viskozity^{20–22}.

Vytváranie klastrov v dôsledku pôsobenia externého magnetického poľa procesom magnetoforézy je potvrdené na obr. 7. Ako je z charakteristík zjavné, vektory magnetického poľa boli v tomto prípade kolmé a rovnobežné na vektor elektrického poľa. Ako bolo spomenuté vyššie, kombináciou vzájomného vplyvu týchto polí dochádza nielen k zmene trajektórie nanočastíc v medzielektrodovom priestore, ale rovnako tiež k zmene mechanizmu vytvárania dlhých reťazcov. V tomto prípade ide o vzájomnú interakciu dvoch polí, v dôsledku ktorej dochádza k diferencovaniu nanočastíc podľa ich magnetizácie a teda prerozdeleniu vytvárania klastrov vplyvom magnetického a elektrického poľa. Takto môžu v objeme kvapaliny vznikajú rôzne zoskupenia nanočastíc, ktoré prekonávajú hydrofóbne správanie sa surfaktantu, ovplyvňujú polarizačné procesy v týchto kvapalinách. V prípade merania elektrickej kapacity a aplikovaní nízkeho napätia dochádza k významnému zníženiu vplyvu silného elektrického poľa na štrukturalizáciu a prevláda vytváranie dlhých reťazcov do smeru siločiara pôsobiaco magnetického poľa.



Obr. 7. Časová závislosť polarizačného prúdu vzorky magnetickej kvapaliny s $c = 0,5\%$ v počiatočnom a tepelne degradovanom stave, spolu s aplikáciou vektora magnetického poľa v dvoch smeroch

6. Záver

Moderné elektroenergetické zariadenia kladú na izolačný systém veľký dôraz z pohľadu bezpečnosti, ekonomiky prevádzky, environmentálnej záťaže a dielektrických vlastností. Tieto požiadavky ponúkajú priestor pre inovácie v oblasti izolačných materiálov. Jednou z možností nahradenia štandardných kvapalných dielektrík je použitie kompozitných nanokvapalín kombinujúcich vlastnosti kvapalných a tuhých látok. Tieto kvapaliny vzhľadom na svoj zvýšený chladiaci výkon v dôsledku zvýšenia tepelnej vodivosti termomagnetickou konvekciou, poskytujú možnosť zníženia objemu chladiacej kvapaliny v zariadení a redukujú tým riziko a rozsah environmentálnych škôd v prípade havárie. Keďže zariadenia v elektroenergetike predstavujú investične náročné zariadenia, je na mieste potreba aplikovať na nové materiály dostupné diagnostické metódy, ktorými je možné zabrániť vzniku trvalého poškodenia týchto zariadení. Je teda nutnosťou skúmať vlastnosti magnetických kvapalín dostupnými metódami a súčasne hľadať vhodné diagnostické metódy pre tieto kvapaliny. Jedným z dôležitých diagnostických faktorov je nabíjací prúd (určený polarizačnými procesmi), ktorý reprezentuje štrukturálne zmeny a celkový stav dielektrika.

Vzhľadom na zložitú štruktúru magnetických nanokvapalín sú prebiehajúce procesy polarizácie ovplyvnené pôsobiacimi poľami. Ako bolo experimentálne dokázané, anomálie vo veľkosti polarizačného prúdu v časovej oblasti predstavujú z pohľadu diagnostiky a profylaktiky ťažko

predikovateľné správanie, keďže vektor nestacionárneho magnetického poľa prítomný v blízkosti vinutí elektrických zariadení môže rôznym spôsobom ovplyvniť procesy štrukturalizácie nanočastic a teda zmenu výsledných dielektrických parametrov magnetickej kvapaliny. Z dlhodobého horizontu je však dôležité zachovanie koloidnej stability týchto kvapalín, keďže ako bolo zistené, tepelnou degradáciou nedochádza len k zmenám vo štruktúre nosnej kvapaliny – transformátorového oleja, ale rovnako aj vo väzbách medzi povrchovo aktívnou látkou a nanočasticami. V experimentoch realizovaných z pohľadu štandardnej diagnostiky v extrémnych podmienkach ($T = 403\text{ K}$) už po čase degradácie niekoľko desiatok hodín došlo k úplnému rozkladu kvapaliny na jednotlivé zložky a teda zánik koloidnej stability. Vysoké náklady na výrobu týchto magnetických nanokvapalín by mali byť utlmené z pohľadu ich diagnostikovania po implementácii do nových alebo už používaných transformátorov. Je dôležité skúmať, či doteraz objavené diagnostické prostriedky dokážu vierohodne predikovať správanie sa nanokvapaliny počas jej degradácie v zariadeniach. Tieto dielektrickou spektroskopiou namerané hodnoty a získané poznatky z oblasti správania sa magnetických kvapalín v oblasti tepelného namáhania predstavujú priestor pre budúci výskum pre dlhodobú aplikáciu týchto kvapalín v elektroenergetických a elektroenergetických zariadeniach. Nutnosť nových spektroskopických prístrojov či iných technológií by v budúcnosti mohla odradiť distribučné alebo prenosové spoločnosti k použitiu takýchto nanokvapalín. Preto je

výskum ich vlastností pomocou doteraz zaužívaných metód dôležitý a nezanedbateľný.

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/ Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky, ITMS 26220120055.

LITERATÚRA

- Závišová V.: *Magnetické častice a magnetické kvapaliny*. Ústav exp. fyziky SAV, Košice 2008.
- Šimek M., Grünwaldová V., Kratochvíl B.: *Chem. Listy* 108, 50 (2014).
- Nováková T., Šváb M., Švábová M.: *Chem. Listy* 103, 524 (2009).
- Marton K., Tomčo L., Cimbala R., Kolcunová I., Kopčanský P., Konecká M., Timko M.: *Proc. of the 5th Inter. Sc. Symp. on El. P. Eng. – Elektroenergetika 2009*, 23-25 Sept., 271, (2009).
- Marton K., Tomčo L., Király J., Cimbala R., Kolcunová I., Timko M., Kopčanský P., Molčan M., Rajňák M.: *El. Power Eng. 2012: Proceed. of the 13th Inter. Scient. Conf. EPE 2012, Brno, 23.-25. May*, 472 (2012).
- Babayán V., Kazantseva N. E., Moučka R., Vilčáková J., Sába P.: *Chem. Listy* 108, s4 (2014).
- Sádecká J., Labuda J., Uričková V.: *Chem. Listy* 106, 739 (2012).
- Marton K., Tomčo L., Herchl F., Kolcunová I., Konecká M., Kopčanský P., Timko M.: *Diagn. 07, Plzeň, 11.-13. Sept.*, 227 (2007).
- Marton K., Tomčo L., Herchl F., Kopčanský P., Dolník B., Timko M., Konecká M.: *Proc. DISEE 2006*, 16.
- Safarova K., Mashlan M., Kubinek R., Pechousek J.: *Chem. Listy* 102, s4 (2008).
- Sundar L., Syam Sharma K. V., Naik M. T., Singh M. K.: *Renewable Sustainable Energy Rev.* 25, 670 (2013).
- Miao J., Dong M., Ren M., Wu X., Shen L., Wang H.: *J. Appl. Phys.* 113, 204103 (2013).
- Baqeri S., Akhavan-Behabadi M. A., Ghadimi B.: *Int. Commun. Heat Mass Transfer.* 55, 71 (2014).
- Cimbala R.: *Starnutie vysokonapäťových izolačných systémov*, FEI-TU, EQUILIBRIA, Košice 2007.
- Fofána I., Bouaicha A., Farzaneh M.: *Eur. Trans. El. Power* 21, 1110 (2011).
- Badicu L. V., Gorgan B., Dumitran L. M., Notingher P. V.: *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 19, 1544 (2012).
- Cimbala R., Kršňák I., Kolcunová I.: *J. Acta Polyt. Prague* 43, 3 (2003).
- Király J., German-Sobek M.: *12th SCYR Herlany*, 259 (2012).
- Marton K., Cimbala R., Kolcunová I., Király J., Tomčo L., Timko M., Kopčanský P., Molčan M.: *ElectroScope* 6, 1 (2011).
- Yuefan D., Yuzhen L., Chengrong L., Yuxiang Z., Mutian C., Shengnan Z., You Z., Zhengqi C.: *Colloids Surf., A* 415, 153 (2012).
- Ping Z., Jian L., Cai-Xin S., Zhang Z. T., Liao R. J.: *Phys. Lett. B* 25, 2021 (2011).
- Kudelcik J., Bury P., Drga J., Kopčanský P., Závišová V., Timko M.: *J. Magn. Magn. Mater.* 326, 75 (2013).
- Mahmud S., Golosnoy I. O., Chen G., Wilson G., Jarman P.: *Electr. Insul. Dielectr. Phenom.* 10, 383 (2012).
- Watarai H., Suwa A., Iiguni Y.: *Anal. Bioanal. Chem.* 2, 1693 (2003).
- Gao Y. J., Zhanga L. F., Huang J. P.: *J. Phys. Chem.* 3, 10785 (2007).

R. Cimbala, J. Király, M. German-Sobek, S. Bucko, J. Kurimský, and J. Džmura (Department of Electric Power Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University Košice, Slovakia): **Polarization Phenomena in Magnetic Liquids**

This review describes the influence of non-ionizing electric field on polarization phenomena observed via charging currents in magnetic liquid. Transformer oil was a supporting fluid colloidal system. Surfactant as a further component of magnetic fluid acted as surface-active substance preventing settlement of nanoparticles. Thermal ageing of samples with different concentrations of magnetite particles (starting from 10 in 20 nm) was carried out. An influence of DC voltage on charging current was observed in the course of time. Thermal ageing and concentration of magnetic nanoparticles in liquids had an influence on charging current shape. The changes are suitable diagnostics parameters for of quality evaluation of magnetic liquid serving as insulation material.