

Karol Marton, Ladislav Tomčo, Jozef Király, Roman Cimbala, Irida Kolcunová, Milan Timko,
Peter Kopčanský, Matúš Molčan, Michal Rajňák

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach
Katedra aerodynamiky a simulácií, Letecká fakulta, Technická univerzita v Košiciach
Ústav experimentálnej fyziky, Slovenská akadémia vied

Vplyv frekvencie elektromagnetického poľa na magnetodielektrickú anizotropiu v magnetických kvapalinách

Abstrakt. Príspevok je venovaný javu magneto - dielektrickej anizotropie vyskytujúcej sa v magnetických kvapalinách o rôznej koncentrácii pri pôsobení striedavého elektrického poľa o intenzite E sinusového priebehu v širokom pásme frekvencií. Na kvapalnú médium, ktorého základ tvorí transformátorový olej, povrchovo aktívna látka a nanočastice magnetitu pôsobí súčasne elektrické pole E a magnetické pole H .

Výskum je realizovaný v oblasti priemyselnej frekvencie cez oblasť ultrazvukovú po rádiových frekvenciách a poukazuje na priebeh relatívnej permitivity a činiteľa dielektrických strát v magnetických kvapalinách. Článok je doplnený teoretickou analýzou a experimentom, ktorý vyúsťuje do aplikácie skúmaných kvapalín vo forme náhrady transformátorového oleja magnetickou kvapalinou.

Kľúčové slová: Magnetická kvapalina, nanočastice, surfaktant, anizotropia, kapacita, dielektrické straty.

Úvod

Výskum dielektrických a magnetodielektrických vlastností magnetických kvapalín je úzko spojený s magnetodielektrickým javom ako aj s magnetodielektrickou anizotropiou [2][3].

Týmito otázkami sa venovali viacerí autori [2] v prvej a čiastočne v druhej polovici osemdesiatych rokov, avšak práce mali prevažne teoretický charakter a boli menej podporené experimentom. V závere predchádzajúceho storočia a najmä v uplynulých rokoch bola z dielektrických vlastností skúmaná elektrická pevnosť magnetických kvapalín v kombinovanom elektrickom poli s poľom magnetickým pri usporiadaní: E – variab; $H=0$; $E \parallel H$ a $E \perp H$, pričom aplikované elektrické pole bolo vyvolané jednosmerným napätím, prípadne striedavým napätím (50 Hz a 800 Hz) sinusového priebehu (pozri tiež [3][4][10][11]). Výsledky z výskumu elektrickej pevnosti magnetických kvapalín o rôznych koncentraciách (0,125% - 4%) pri voľbe vyššie uvedeného usporiadania taktiež poukázali na magnetodielektrickú anizotropiu, prejavujúcou sa značnou zmenou elektrickej pevnosti sledovanej magnetickej kvapaliny.

Jednou z pozorovaných makroskopických výpovedeschopných veličín je relatívna permitivita (ϵ_r) magnetickej kvapaliny. Permitivita je funkciou aplikovaného poľa a vzájomnej orientácie elektrického poľa a intenzity magnetického poľa (resp. magnetickej indukcie B). Magnetodielektrické správanie sa magnetických kvapalín môže byť vysvetlené buď orientáciou nesférických častíc [3] alebo priestorovým rozdelením magnetickej častíc pod vplyvom vonkajšieho magnetického poľa (vytváranie retiazkových a klastrových štruktúr).

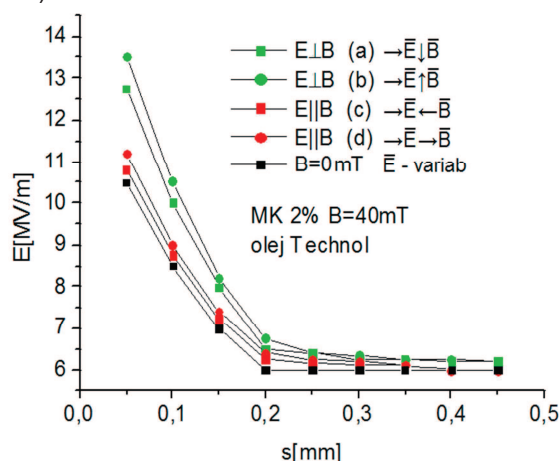
V prípade, že sa predpokladá nesférický tvar magnetickej častice, orientácia častice môže meniť celkovú elektrickú susceptibilitu magnetickej kvapaliny, čo vyvolá magnetodielektrický jav. Podľa [3] je známe, že dipól – dipólová interakcia medzi magnetickými časticami má za následok vzájomné priťahovanie susedných častíc. Za prítomnosti magnetického poľa magnetickej častice vytvárajú retiazky a retiazkové klastre, v rámci ktorých sú častice spojené magneticky. Teoretické výsledky klastrového a retiazkového modelu umožňujú vysvetliť vzrast magnetodielektrického javu.

Magnetodielektrické vlastnosti kvapalín a parameter anizotropie

V prácach, v ktorých sa diskutuje magnetodielektrický jav je uvedená definícia parametra anizotropie $g(B)$ [1],[2] vzťahujúcej sa na relatívnu permitivitu:

$$(1) \quad g(B) = - \frac{\epsilon_{\parallel}(B) - \epsilon(0)}{\epsilon_{\perp}(B) - \epsilon(0)}$$

kde $\epsilon_{\parallel}(B)$ a $\epsilon_{\perp}(B)$ sú permitivity pre $\vec{E} \parallel \vec{B}$ a $\vec{E} \perp \vec{B}$ a $\epsilon(0)$ pri $\vec{B} = 0$. Pri výskume elektrickej pevnosti magnetickej kvapaliny o definovaných koncentraciách aj pri aplikovaní striedavého elektrického poľa o $f=50$ Hz bola pozorovaná anizotropia. Uvedme ako ilustračný príklad priebeh $E=f(s)$ znázornený na obrázku 1 pričom krivky boli namerané pri konštantnej hodnote magnetickej indukcie $B = 40$ mT a variabilnej intenzite elektrického poľa E . V priebehu merania elektrickej pevnosti boli okrem orientácie elektrického poľa E zmenené aj orientácie vektorov B . Najvýznamnejší prejav anizotropie bol pozorovaný v oblasti silných polí (nad 10^7 V/m).



Obr.1. Magnetodielektrická anizotropia pri sledovaní $E=f(d)$, pričom $f=50$ Hz [10][11]

Pri výskume závislosti anizotropie v širšom rozsahu frekvencie (od 50 Hz do 2 MHz) bola meraná anizotropia pre dve skúmané veličiny: relatívnu permitivitu a stratový činiteľ $tg\delta$, pričom parametrom bol stupeň magnetizácie označený ako MF1 až MF5.

Relatívna permitivita určuje kapacitu kondenzátora, ktorého dielektrikum v našom prípade tvorí kvapalné médium vo forme magnetickej kvapaliny. Jedná sa o koloidnú sústavu, ktorej základom je transformátorový olej, nanočastice a povrchovo aktívna zložka (surfaktant) – kyseliny olejovej.

Teoretická úvaha charakterizujúca závislosť relatívnej permitivity a stratového činiteľa od frekvencie

Pri odvodení relatívnej permitivity je potrebné zohľadniť celkovú polarizáciu kvapalného média, ktorá vyjadruje súčinnosť polarizovateľnosti k -častíc z i -tého počtu častíc o koncentrácii n_i . Veľkosť dipólového momentu nech je m_i , takže vzhľadom na aplikovanú intenzitu elektrického poľa E bude $m_i = a_i \cdot E$. Hodnota E nie je totožná s geometrickou hodnotou intenzity poľa daného usporiadania.

Vychádzajúc z predloženej úvahy bude celková polarizácia P daná vzťahom [6],[8]:

$$(2) \quad P = \sum_{i=1}^k \eta_i m_i$$

A výraz vyjadrujúci frekvenčnú závislosť relatívnej permitivity bude mať nasledujúci tvar [6]:

$$(3) \quad \epsilon_r = 1 + \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^k \frac{n_i a_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2}$$

Kde	ϵ_0	-	permitivita vákua $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m
	n_i	-	koncentrácia častíc
	m_i	-	dipólový moment
	τ	-	časová konštanta
	a_i	-	polarizovateľnosť

Analogicky podľa [6] sa dá odvodiť vzťah pre stratový činiteľ izolantu (tangens uhla dielektrických strát):

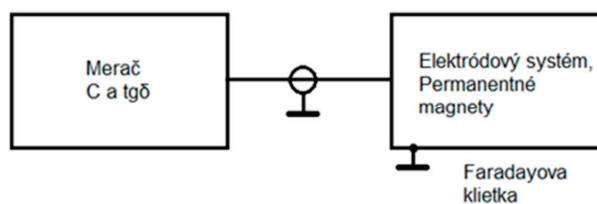
$$(4) \quad tg\delta = \frac{\gamma_0 + \sum_{i=1}^k n_i a_i \frac{\omega^2 \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2}}{\omega \epsilon_0 + \sum_{i=1}^k n_i a_i \frac{\omega}{1 + \omega^2 \tau_i^2}}$$

V predloženej práci bude podaný dôkaz o reálnom priebehu frekvenčných závislostí magnetickej kvapaliny. V rovnici (4) vystupuje hodnota mernej vodivosti γ_0 . Výška frekvencie ($\omega = 2\pi f$) vystupuje dominantne v menovateli výrazu, čo značne ovplyvní priebeh $tg\delta$ pri vyšších frekvenciách.

Experiment a výsledky

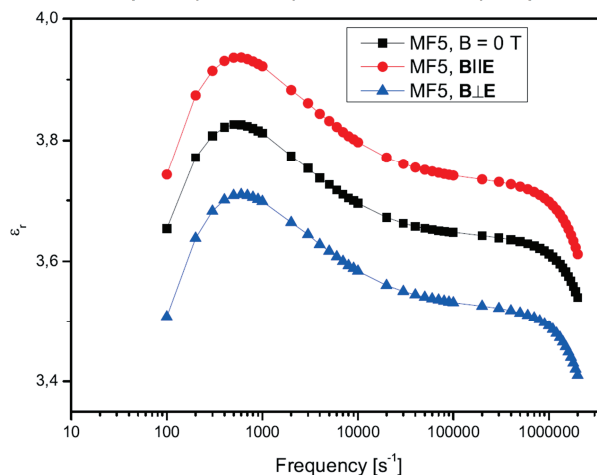
Vzhľadom na to, že experimenty boli orientované na meranie (stanovenie) dielektrických parametrov kvapaliny v širokom pásme frekvencií od 100 Hz do 2 MHz, bolo nutné z hľadiska elektromagnetickej kompatibility mernú nádobu vybavenú elektródovým systémom planoparalelných elektród (Cu) s možnosťou uloženia permanentných magnetov umiestniť do Faradayovej klietky s kvalitným uzemnením. Použitý materiál : Fe. Merač kapacity a stratového činiteľa

tvoril jednotku s generátorom vF napätia, mikropočítačom a monitorom (obr. 2).



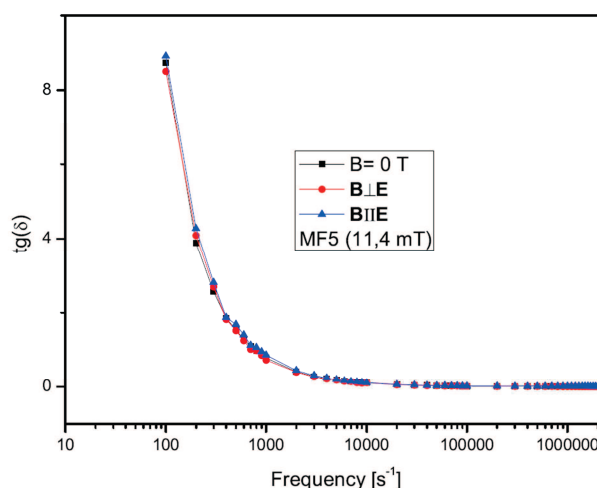
Obr.2. Blokova schéma meracieho systému

Kontinuálne boli snímané hodnoty C a tangens δ pri rešpektovaní orientácie vektorov $\vec{E} \parallel \vec{B}$ ako aj $\vec{E} \perp \vec{B}$. Základné meranie bolo realizované pri $B=0$. Rovnako boli stanovené aj krivky pre čistý transformátorový olej.



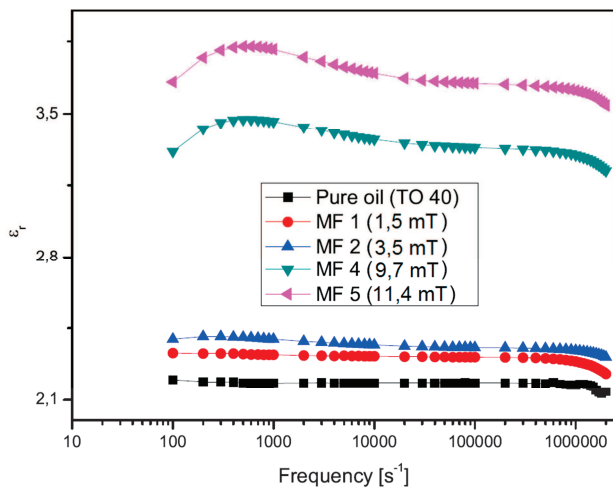
Obr.3. Priebeh závislosti relatívnej permitivity pre kvapalinu MF5 ($\phi=2,03\%$) pre rôznu orientáciu E a B

Z Priebehov vyplýva, že sa prejavuje značná anizotropia v magnetickej fluide, pričom na priebehu $tg\delta=f(\omega)$ – pozri obr. 4 sa pri rozdielnej orientácii anizotropia výrazne neprejavuje, nakoľko sú straty prevažne vodivostného charakteru.

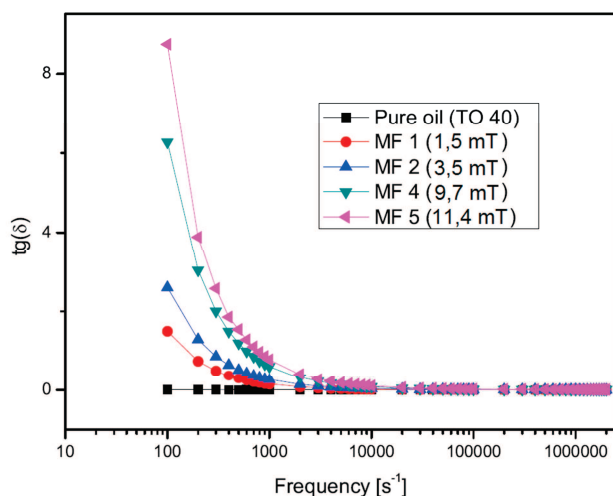


Obr.4. Frekvenčná závislosť činiteľa dielektrických strát v kvapaline MF5 pri indukčnosti $B=11,4$ mT a $\phi=2,03\%$

V ďalšej etape experimentov bola skúmaná závislosť oboch vyššie uvedených veličín od frekvencie pri rozdielnej objemovej koncentrácii magnetickej nanočastíc (pozri obrázok 5 a obrázok 6)



Obr.5. Závislosť relatívnej permitivity od frekvencie pri rozdielnej hodnote magnetizácie M_s nanočastíc v kvapaline



Obr.6. Činiteľ dielektrických strát ako funkcia frekvencie pri rozdielnych hodnotách magnetizácie nanočastíc v magnetickej kvapaline.

Sledovaním priebehov na obrázkoch 3 až 6 sa odzrkadľujú elektro-fyzikálne fenomény pri pôsobení kombinovaného elektrického a magnetického poľa MK v definovanom pásme frekvencií f . V prípade relatívnej permitivity bez účinkov magnetickej indukcie sa výrazne prejavuje pri nižších frekvenciách zvýšená hodnota, čo súvisí s polarizovateľnosťou kvapalného média. Pri paralelnom usporiadaní $\vec{E} \parallel \vec{B}$ dochádza k prevládajúcemu translačnému pohybu častíc v koloidnej sústave, čím sa zhoršia podmienky pre účinné spolupôsobenie vektora polarizácie. Ak skúmame pomery v prípade kolmého usporiadania $\vec{E} \perp \vec{B}$ dochádza k špirálovitému pohybu nanočastíc v sústave čo pravdepodobne zvyšuje dráhu nanočastíc a znižuje ich účinky na ich usporiadanie a spôsobuje pokles relatívnej permitivity. Analogické vysvetlenie charakterizuje pomery aj pri skúmaní priebehu $tg\delta = h(f)$.

Záver

Čitateľovi bola predložená úvaha o vplyve harmonického sínusového napätia na pohyblivosť nanočastíc v magnetickej kvapaline a na ich orientáciu v širokom pásme frekvencií ako aj na magnetodielektrickú anizotropiu. Pri meraniach pod 100 Hz sa vyskytli určité nestability v priebehoch relatívnej permitivity a $tg\delta$, z toho dôvodu bude v ďalšej etape kladený dôraz na testovanie

výpovede schopných veličín pri frekvenciách nižších ako 100 Hz po úroveň 0,01 Hz.

Keďže je magnetická kvapalina na báze transformátorového oleja uvažovaná na použitie vo VN transformátoroch vo forme izolačného média, bude potrebné jeho elektrické vlastnosti študovať aj pri teplotách vyšších (napr. 80 °C) v navrhovanom frekvenčnom rozsahu. Význam aplikácie MK v transformátoroch spočíva aj v tom, že pri vyššej elektrickej pevnosti sa vyznačuje vyššou tepelnou vodivosťou než bežný transformátorový olej, čo má z hľadiska chladenia veľký význam.

Podakovanie

Autori vyslovujú poďakovanie Vedeckej grantovej agentúre pri MŠ SR a SAV za podporu pri riešení tejto úlohy pod číslom 1/0487/12 a úlohy 2/0043/12.

Podporujeme výskum na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný z EÚ fondov. Tento príspevok bol vypracovaný v projekte "Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky", ITMS 26220120055.

Súčasne poďakovanie patrí centru excelentnosti Nanofluid a MŠ SR Agentúre pre štrukturálne fondy EÚ na projekte 26220220061 a 26220120046.



Použitá literatúra

- [1] Espurz A., Alameda J.M., In: J.Phys.D: Appl.Phys. 22 (1989) 1174
- [2] Mailfert A.J., Nahounou B., Dielectric behaviour of a ferrofluid subjected to a uniform magnetic field. In: IEEE Trans.Magn.16 (1980) 254
- [3] Tomčo L.: Habilitačná práca, UPJŠ Košice 2007
- [4] Marton K., Tomčo L., Kopčanský P., Herchl F., Timko M., Koneracká M.: The development of electric breakdown in magnetic fluids in combined magnetic and electric fields. In: Przeglad Elektrotechniczny 1, 161, ISSN 1731-6103.
- [5] Vera V. Daniel: Dielectric relaxation. London – New York: Academic Press, 1967. 281 p. 978-0122019500.
- [6] Vajda, Gy.: A szigetelések rombása és rombásnik vizsgálat, Akadémia kiadó Budapest 1964, p. 95 – 97
- [7] Arthur R. von Hippel: Molekulová fyzika hmoty, Praha: SNTL 1963
- [8] Marton, K: Fyzika a technológia polovodivých, vodivých a magnetických materiálov, Bratislava: Alfa 1970. 292 p.
- [9] Schultz, W: Dielektrische und magnetische Eigenschaften der Werkstoffe, Vieweg Verlag, Braunschweig 1970
- [10] Marton, K., Tomčo, L.: Breakdown and partial discharges in magnetic fluids; Journal of Physics: Condensed matter, Vol. 20 no. 20; 2008
- [11] Marton, K., Tomčo, L.: Dielectric properties of magnetic liquids in high electric fields; Acta Physica Polonica A; vol. 113, No. 1; 2008
- [12] Drapela, J., Toman, P. Interharmonic – Flicker Curves of Lamps and Compatibility Level for Interharmonic Voltages. 2007 IEEE Laussane Powertech, Switzerland. IEEE PES, 2007, pp. 1552-1557, ISBN 978-1-4244-218

Autori: Karol Marton, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: karol.marton@tuke.sk

Ladislav Tomčo, Katedra aerodynamiky a simulácií, Letecká Fakulta Technickej univerzity v Košiciach, Rampová 7, 041 21 Košice, E-mail: ladislav.tomco@tuke.sk

Jozef Király, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jozef.kiraly@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

Iraida Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: iraida.kolcunova@tuke.sk

Milan Timko, Ústav experimentálnej fyziky, Slovenská akadémia vied, Watsonova 47, 040 01 Košice, E-mail: timko@saske.sk

Peter Kopčanský, Ústav experimentálnej fyziky, Slovenská akadémia vied, Watsonova 47, 040 01 Košice, E-mail: kopcan@saske.sk

Matúš Molčan, Ústav experimentálnej fyziky, Slovenská akadémia vied, Watsonova 47, 040 01 Košice, E-mail: molcan@saske.sk

Michal Rajňák, Ústav experimentálnej fyziky, Slovenská akadémia vied, Watsonova 47, 040 01 Košice, E-mail: rajnak@saske.sk