

Dielektrické a magnetodielektrické vlastnosti magnetických kvapalín

Marton K. – FEI TU Košice, Tomčo L. – LF TU Košice, Herchl F. – UEF SAV Košice, Kolcunová I. - FEI TU Košice, Koneracká M. – UEF SAV Košice, Kopčanský P., Timko M. – UEF SAV Košice

Anotace

There are described characteristic dielectric and magnetodielectric properties of magnetic fluids in a contribution. The behaviour of magnetic fluids in AC electric field with frequency $f = 50$ Hz is defined. Measurements were carried out in combined electric and magnetic field, when fields were parallel ($\mathbf{E} \parallel \mathbf{H}$), perpendicular ($\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$) and without presence of magnetic field ($\mathbf{H} = 0$). Analysis of these properties were done for magnetic fluids based on inhibited transformer oil ITO 100 with volume concentrations of magnetit particles ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) in range from 0,185 % up to 3,214%.

Úvod

Výskum dielektrických a magnetodielektrických vlastností magnetických kvapalín je úzko spojený s magnetodielektrickým javom, ktorý sa prejavuje magnetodielektrickou anizotropiou [3]. Výsledky výskumu elektrickej pevnosti magnetických kvapalín s rôznymi koncentraciami magnetitových častíc (0,125%-4%) pri voľbe vyššie uvedeného usporiadania taktiež poukázali na magnetodielektrickú anizotropiu, ktorá sa prejavuje značnou odlišnosťou elektrickej pevnosti sledovanej magnetickej kvapaliny v závislosti od orientácie elektrického a magnetického poľa. Jednou z pozorovaných makroskopických výpovedeschopných veličín je relatívna permitivita (ϵ_r) magnetickej kvapaliny. Permitivita je funkciou aplikovaného poľa [1] a vzájomnej orientácie intenzity elektrického a magnetického poľa.

Magnetické kvapaliny v striedavom elektrickom poli pri súčasnom pôsobení magnetického poľa

Sledované boli procesy odohrávajúce sa v makroskopickom prostredí elektródového systému a mikroskopickom prostredí medzi časticami samotnými a vytvorenými zhlukmi – klastrami častíc ihličkovitého tvaru z komplexného hľadiska. Jednou z ciest je riešenie, ktoré poskytuje rovnica vyjadrujúca silové účinky elektrického a magnetického poľa v prostredí.

Sila, pôsobujúca mobilitu častíc v elektrickom poli je funkciou ich hmotnosti, ktorá je závislá od koncentrácie c jej zložiek $m(c)$, ďalej od lokálnej mernej hmotnosti, ktorú spôsobujú zhluky častíc. Pri aplikovaní striedavého elektrického poľa frekvencie 50Hz nie je zanedbateľná Stokesova sila, vyjadrujúca účinky dynamickej viskozity média.

Z hľadiska spoluúčinkovania magnetického poľa o indukcii \mathbf{B} hrá dôležitú úlohu rýchlosť častíc \mathbf{v} a orientácia jej zložiek (\mathbf{v}_{\parallel} , resp. \mathbf{v}_{\perp}) vzhľadom na vektor \mathbf{E} , prípadne \mathbf{B} .

Naznačíme riešenie týchto prípadov:

a) \mathbf{E} - variabilné; $\mathbf{B}=0\text{mT}$, potom v striedavom elektrickom poli \mathbf{E} sila vyvolá vo vnútri kvapaliny aj mechanické namáhanie (tlakové a ťahové).

Ak prijmeme hypotézu o lokálnych diferenciálnych zmenách permitivity a mernej hmotnosti γ_0 v MK pôsobením silného elektrického poľa, potom existuje objemová sila vyvolaná nehomogenitou poľa a anizotropiou izolačného média.

Z výskumu vzniku a existencie priestorového náboja v medzielektródovom systéme v magnetickej kvapaline vyplýva [5], že pôsobením elektrického poľa dochádza k polarizácii zložiek MK v nanometrických rozmeroch. Potom na polarizované častice pôsobí gradientová sila.

b) Súčasny vplyv elektrického a magnetického poľa na magnetodielektrické vlastnosti magnetických kvapalín

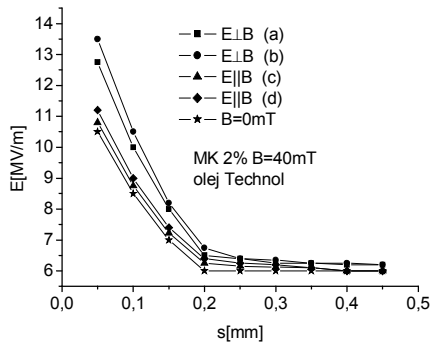
Budú analyzované prípady, ktoré poukážu na to, aké usporiadanie aplikovaného elektrického prípadne magnetického poľa bude dominujúce pri určení permitivity a stratového činiteľa magnetickej kvapaliny pri rešpektovaní anizotropie v skúmanom médiu. Keďže skúmame $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$ a $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$, rozložme vektory rýchlosti \mathbf{v} častíc a intenzity poľa \mathbf{E} na zložky paralelné a kolmé k vektoru magnetickej indukcie \mathbf{B} : $\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\parallel} + \mathbf{v}_{\perp}$ a $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\parallel} + \mathbf{E}_{\perp}$. Ďalšou analýzou sa dá ukázať, že pohyb nabitých častíc v prípade $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ je charakterizovaný dvoma typmi pohybu: driftom s konštantnou rýchlosťou \mathbf{v}_E a pohybom po kružnici s rýchlosťou \mathbf{v}_{\perp} vyvolanou iba magnetickým poľom. V kombinovaných poliach pri existencii \mathbf{v}_E , častice sa posúvajú v smere kolmom k vektorom \mathbf{E} a \mathbf{B} , čo spôsobuje ich pohyb po špirále.

Magnetodielektrické vlastnosti kvapalín a parameter anizotropie

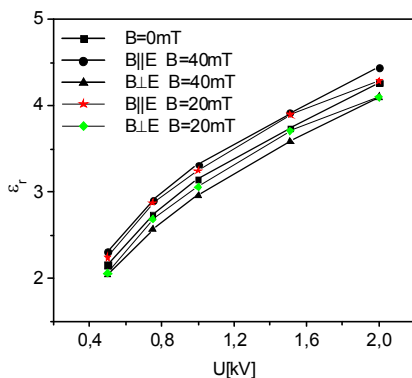
V prácach, v ktorých sa diskutuje magnetodielektrický jav je uvedená definícia parametra anizotropie $g(\mathbf{B})$ [1],[3]:

$$g(\mathbf{B}) = - \frac{\varepsilon_{\parallel}(\mathbf{B}) - \varepsilon(0)}{\varepsilon_{\perp}(\mathbf{B}) - \varepsilon(0)}$$

kde $\varepsilon_{\parallel}(\mathbf{B})$ a $\varepsilon_{\perp}(\mathbf{B})$ sú permitivity pre $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$ a $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ a $\varepsilon(0)$ pre $\mathbf{B}=0$. Pri výskume elektrickej pevnosti magnetickej kvapaliny pri aplikovaní jednosmerného vysokého napätia bola potvrdená anizotropia. Priebeh $E = f(s)$ je znázornený na obr.1.

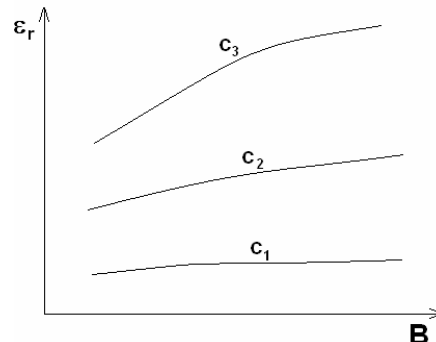


Obr. 1: Elektrická pevnosť magnetickej kvapaliny pri rôznych orientáciách \mathbf{E} a \mathbf{B} (b-opačná orientácia \mathbf{B} oproti prípadu a, c-paralelná, d-antiparalelná orientácia)



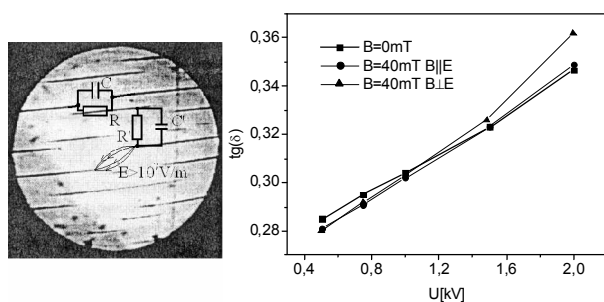
Obr. 2: Závislosť ε_r od priloženého napätia pri rôznych orientáciách \mathbf{B} a \mathbf{E} .

Skúmanie magnetodielektrických vlastností magnetických kvapalín bolo orientované na sledovanie závislostí relatívnej permitivity ε_r od koncentrácie magnetickej kvapaliny, ako aj od hodnoty priloženého napätia na elektródový systém v oblasti slabých elektrických polí do $2,5 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}$. Súčasne boli sledované dielektrické straty v magnetických kvapalinách v závislosti od veľkosti priloženého elektrického napätia a koncentrácie kvapaliny. Zmeny relatívnej permitivity ε_r magnetickej kvapaliny pri nízkej koncentrácii (0,185 %) magnetických častíc v závislosti od napätia (0,5kV-2 kV)

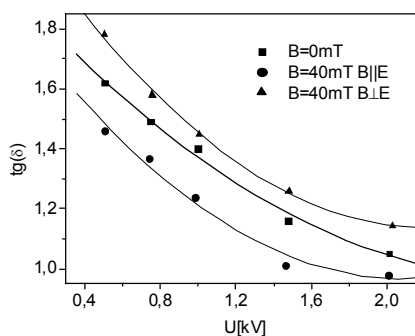


Obr. 3: Vplyv magnetickej indukcie na zmenu ε_r , koncentrácie $c_1 < c_2 < c_3$.

dosahujú nízke hodnoty. Pri vyšších koncentráciách magnetických častíc je závislosť $\epsilon_r = f(U)$ nelineárna (Obr. 2).

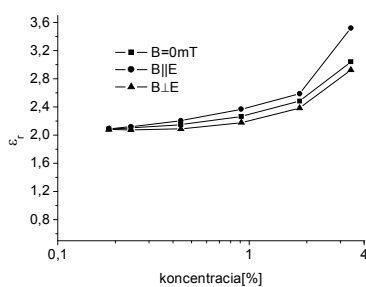


a) b)
Obr. 4: a) Modelovanie pomerov v magnetickej kvapaline koncentrácie 0,185%, b) Závislosť stratového činiteľa od priloženého napätia pri koncentracii 0,185%.

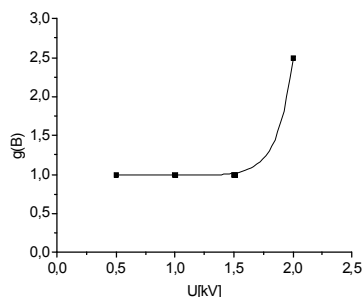


Obr. 5: Závislosť stratového činiteľa od priloženého napätia pri vysokej koncentracii (3,214%) magnetitových častíc.

Hodnoty ϵ_r pri $E\parallel B$, $E\perp B$ a $B=0\text{mT}$ výrazne poukazujú na stupeň anizotropie v magnetických kvapalinách. So zvyšujúcou sa koncentraciou magnetickej kvapaliny sa zvyšuje aj hodnota relatívnej permitivity, čo je dané z fyzikálneho hľadiska zvýšením polarizovateľnosti kvapalného média ako aj predĺžením ihličkovitých klastrov a ich vyššou koncentraciou v jednotke objemu.



Obr. 6: Závislosť relatívnej permitivity od koncentrácie MK.



Obr. 7: Závislosť parametra magnetodielectrickej anizotropie $g(B)$ od priloženého napätia.

Zovšeobecňujúci priebeh relatívnej permitivity ϵ_r v závislosti od aplikovanej magnetickej indukcie B má analogický charakter, pričom parametrom je koncentrácia magnetickej kvapaliny (Obr.3). Miera nárastu relatívnej permitivity nezodpovedá lineárnemu nárastu hodnoty koncentrácie v skúmanom médiu.

Dielektrické straty v magnetickej kvapaline sú definované činiteľom dielektrických strát $\text{tg}\delta$. Veľmi výrazne sa prejavil vplyv nízkej koncentrácie častíc na vývoj dielektrických strát v magnetickej kvapaline (Obr.4b). Pozvoľný zvrät do zmeny mechanizmu dielektrických strát pri zvyšovaní koncentrácie magnetickej kvapaliny spôsobuje aktivizácia priestorových nábojov, predovšetkým pri narastaní napätia. Aplikovaním komplexnej permitivity a vodivosti na riešenie pomerov v zložitej izolačnej sústave (komponenty: transformátorový olej, kyselina olejová, Fe_3O_4 nanočastice) dá sa vysloviť predpoklad, že objemový (priestorový) náboj sústavy pri zvyšovaní napätia narastá a svojou objemovou zotrvačnosťou ako aj zníženou pohyblivosťou v medzielektródovom priestore nie je schopný sledovať zmeny elektrického poľa pri frekvencii 50 Hz. V dôsledku toho stratový činiteľ $\text{tg}\delta$ klesá v závislosti od napätia a kvantitatívne jeho hodnota je niekoľkonásobne vyššia než pri pôvodnej nízkej koncentracii (Obr.5). V oblasti slabých polí bola vyšetovaná závislosť relatívnej permitivity od koncentrácie média. Prejavil sa dominantný vplyv intenzity

elektrického poľa E pri usporiadaní $E \parallel B$ voči $E \perp B$ (Obr.6), o čom svedčí aj parameter anizotropie $g(B)$. Stupeň (parameter) anizotropie pri sledovaní permitivity ϵ_r aplikovaním magnetického poľa o indukciu $B=40\text{mT}$ je na obr.7.

Záver

Predložená práca je príspevkom k štúdiu magnetodielektrických vlastností kvapalných izolačných médií obsahujúcich monodoménové magnetické častice nanometrickej veľkosti z kategórie feritov na báze oxidov železa. Výskum bol realizovaný v kombinovanom elektrickom a magnetickom poli, pričom orientácia aplikovaných polí bola $E \parallel B$, $E \perp B$ a E variabilné pri $B=0\text{mT}$ poukázala na výskyt anizotropie v tomto druhu magnetodielektrických médií, čo bolo dokázané experimentom. Účelovo bolo zvolené striedavé elektrické pole 50Hz, pretože výskum uvedených vlastností by mal poukázať na možnosť použitia magnetických kvapalín vo výkonových transformátoroch.

PodĎakovanie

za podporu pri riešení tejto úlohy v rámci grantu VEGA MŠ SR pod číslom 1/3142/06 a SAV 2/6166/26 a APVT 51-027904.

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: Przegląd Elektrotechniczny 1, 161, ISSN 1731-6103.
5. Marton K., Tomčo L., Herchl F., Kopčanský P., Dolník B., Timko M., Koneracká M.: Priestorové náboje v magnetických kvapalinách pri formovaní sa kanála prierazu. In: Proc. DISEE 2006, 16, ISBN 80-227-2470.
6. Kúdelčík J., Gutten M., Brandz M.: Development of electrical breakdown in transformer oil, Advances in Electrical and Electronic Eng. 5 (2006) 277, ISSN 1336-1376.
7. Marton K.: Klasifikácia objemových síl prispievajúcich k degradácii polymérnej izolácie. In: Ekt. 53 (2000) 92, č.3, ISSN 1335-0676.

Autori

prof. Ing. Karol Marton, DrSc.; Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach; Letná 9, 042 00 Košice; e-mail: karol.marton@tuke.sk

RNDr. Ladislav Tomčo, PhD.; Katedra aerodynamiky a simulácií, Technická univerzita v Košiciach, Rampová 7; 041 21 Košice; e-mail: ladislav.tomco@tuke.sk

RNDr. František Herchl; Ústav experimentálnej fyziky; Slovenská akadémia vied; Watsonova 47, 040 01 Košice; e-mail: herchl@saske.sk

doc. RNDr. Peter Kopčanský, CSc.; Ústav experimentálnej fyziky; Slovenská akadémia vied; Watsonova 47, 040 01 Košice; e-mail: kopcan@saske.sk

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

doc. Ing. Irida Kolcunová, PhD.; Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach; Letná 9, 042 00 Košice; e-mail: iraida.kolcunova@tuke.sk

Ing. Martina Koneracká, CSc.; Ústav experimentálnej fyziky; Slovenská akadémia vied; Watsonova 47, 040 01 Košice; e-mail: konerac@saske.sk