

Michal Rajňák, Katarína Paulovičová, Peter Kopčanský, Milan Timko

## Aplikácie magnetických kvapalín v priemysle

Magnetické kvapaliny predstavujú fascinujúci progresívny materiál s veľkým aplikačným potenciálom. Vďaka nevhodnej kombinácii tekutosti a magnetizmu v magnetických kvapalinách je možné bádať živý záujem o ich využitie v rôznych technických a biomedicínskych sférach. V tomto príspevku stručne opisujeme vybrané vlastnosti magnetických kvapalín, ktoré sú atraktívnym podkladom pre priemyselné aplikácie.

Kľúčové slová: magnetická kvapalina, nanokvapalina, nanočastice

Magnetic fluids represent a fascinating progressive material with great application potential. Thanks to the unusual combination of fluidity and magnetism in magnetic liquids, there is a lively interest in their use in various technical and biomedical areas. In this contribution, we briefly describe selected properties of magnetic fluids, which are an attractive basis for industrial applications. (**Applications of magnetic fluids in industry**)

Keywords: magnetic fluid, nanofluid, nanoparticles

### I. MAGNETICKÉ KVAPALINY

Magnetické kvapaliny patria do širokej množiny nanokvapalín. Pojem nanokvapalina prvýkrát zaviedol Choi ešte v roku 1995 a chcel ním vyjadriť nový typ kvapaliny vytvorenej na báze nanotechnológií [1]. Koncept a vývoj nanokvapalín majú však dlhšiu históriu a odrážajú úsilie vedcov o zlepšenie fyzikálnych vlastností klasických kvapalín, akými sú napríklad oleje a voda. Spôsob, ako dosiahnuť toto zlepšenie sa opiera o 150 rokov starú ideu slávneho J. C. Maxwella, ktorý predpokladal, že tepelná alebo elektrická vodivosť kvapalín sa efektívne zmení pridaním kovových častíc do kvapaliny [2]. Počiatočné praktické pokusy o tvorbu suspenzií milimetrových alebo mikrometrových častíc v kvapaline však narazili na vážny problém, a to rýchlu sedimentáciu. Neskôr, po predstavení Feynmanovho konceptu mikrosвета [3] sa moderná veda a technológie začali uberať cestou miniaturizácie, ktorá viedla až ku kontrolovanej výrobe nanočastíc.

Vychádzajúc zo všeobecných charakteristík nanokvapalín je možné definovať magnetickú kvapalinu ako stabilnú koloidnú suspenziu magnetických nanočastíc v nosnej kvapaline. Ich výnimočnosť spočíva v tom, že obsahujú magnetické nanočastice (často na báze železa), vďaka čomu sa v magnetických kvapalinách vyskytuje jedinečná kombinácia dvoch, na prvý pohľad nezlučiteľných vlastností, a to tekutosti a magnetizmu. Vo väčšine magnetických kvapalín pre technologické a biomedicínske aplikácie je magnetický materiál (nanočastice) reprezentovaný jedným z rôznych feritov. Najbežnejšie používanými feritmi sú magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a maghemit ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). Magnetit sa však oxidáciou môže veľmi rýchlo premieňať na maghemit, a preto štruktúrne zloženie nanočastíc v magnetických kvapalinách zvyčajne predstavuje prítomnosť oboch feritov v neurčenom pomere [4]. Je zaujímavé, že prvé pokusy o prípravu magnetických kvapalín siahajú až do roku 1938, teda dávno pred éru nanotechnológií [5]. Intenzívnejší výskum stabilných magnetických kvapalín s reálnymi technologickými aplikáciami sa objavil v šesťdesiatych rokoch dvadsiateho storočia. V tom období bola výrazným míľnikom idea Steva Papella vytvoriť magnetickú kvapalinu z raketového paliva [6]. Takéto magnetické palivo by mohlo byť v bezťažkovom stave dopravované zo zásobníka

do motora rakety len pomocou magnetu. Odvtedy sa magnetické kvapaliny vyvíjajú a skúmajú pre rôzne aplikácie.

### II. APLIKÁCIE MAGNETICKÝCH KVAPALÍN

Aplikácie nanokvapalín vo všeobecnosti si nachádzajú svoje miesto vo viacerých technických odvetviach. Snáď najväčší záujem o nanokvapaliny je v oblasti tepelného transportu. Nanokvapaliny majú oproti svojim nosným kvapalinám výrazne zvýšenú tepelnú vodivosť, a preto môžu slúžiť ako efektívne chladiace média v rôznych zariadeniach, napr. v tepelných výmenníkoch, elektronických chladiacich systémoch, ale napríklad aj v reproduktoroch, kde okrem odvodu tepla sa podieľajú aj na tlmení kmitov cievky. V prípade magnetických kvapalín sa pri ich aplikáciách využíva možnosť ovládania ich vlastností (tepelných, optických, elektrických, tokových atď.) pomocou magnetického poľa. Vďaka rôznorodosti nanokvapalín existuje aj množstvo oblastí pre ich využitie. Na Slovensku sa výskumom a vývojom nanokvapalín a zvlášť magnetických kvapalín dlhodobo zaoberajú vedci z Ústavu experimentálnej fyziky SAV, v.v.i. a Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Jednou z tém, ktorej sa intenzívne venujú sú magnetické kvapaliny pre potenciálne aplikácie v elektrotechnike. Tieto magnetické kvapaliny sa vyrábajú na báze elektroizolačných kvapalín, akými sú transformátorové oleje. Tie sa vyrábajú z ropy, ale používajú sa aj ekologickejšie oleje z prírodných a syntetických esterov. Nanočastice, ktoré tvoria disperznú fázu týchto magnetických kvapalín, sú často z oxidov železa (napr.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a na povrchu sú pokryté vrstvou kyseliny olejovej. Jej úlohou je vytvárať priestorovú zábranu a nedovoliť vzniku dotyku medzi nanočasticami, čo by mohlo viesť k ich zhlukovaniu a následnej sedimentácii.

Pri výskume magnetických kvapalín pre elektrotechniku je nutné poznať ich správanie pod vplyvom elektrického poľa. Prítomnosť magnetických nanočastíc v transformátorovom oleji môže pozitívne ovplyvniť jeho elektroizolačné vlastnosti, najmä elektrickú pevnosť, čiastočné výboje a dielektrickú permitivitu. Tieto elektrické vlastnosti sú do značnej miery závislé aj od pôsobenia magnetického poľa a od smeru intenzity magnetického poľa vzhľadom na intenzitu elektrického poľa. Táto závislosť súvisí s mikroštruktúrou

magnetických kvapalín, ktorá sa vytvára pri interakcii magnetických nanočastíc s magnetickým poľom. Výsledkom takej interakcie sú napríklad retiazkové štruktúry nanočastíc v objeme magnetickej kvapaliny, pozdĺž ktorých je uľahčený nielen transport elektrického náboja, ale aj transport tepla. Štrukturalizácia magnetických kvapalín v magnetickom poli je celkom intuitívna a na vedeckej úrovni dôkladne prebádaná. Na spomínaných košických pracoviskách sa však zistilo, že aj elektrické pole môže za určitých okolností vyvolať výrazné makroskopické štruktúry v magnetických kvapalinách [7].

### III. ATRAKTÍVNE DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH KVAPALÍN PRE ELEKTROTECHNICKÉ APLIKÁCIE

Jedným zo zaujímavých javov pozorovaných v magnetických kvapalinách je magnetodielektrická anizotropia. Tento jav poukazuje na závislosť dielektrických veličín magnetickej kvapaliny od aplikovaného magnetického poľa a jeho orientácii vzhľadom na elektrické pole. Príčina tohto javu bola najskôr pripisovaná orientácii elipsoidných magnetických častíc paralelne so smerom magnetického poľa. V súčasnosti je viacej akceptované vysvetlenie, pripúšťajúce tvorbu retiazkových štruktúr pod vplyvom magnetického poľa. Kvantitatívne sa tento jav zvyčajne hodnotí parametrom magnetodielektrickej anizotropie  $g(B)$ , ktorý je definovaný nasledovne [8] takto

$$g(B) = -(\varepsilon_p(B) - \varepsilon(0)) / (\varepsilon_k(B) - \varepsilon(0))$$

kde  $\varepsilon_p$  je permitivita magnetickej kvapaliny meraná pri paralelnej orientácii intenzity elektrického a magnetického poľa,  $\varepsilon_k$  je permitivita meraná pri kolmej vzájomnej orientácii intenzít a  $\varepsilon(0)$  je permitivita meraná v nulovom magnetickom poli.

Magnetodielektrický efekt v magnetických kvapalinách bol pozorovaný vo viacerých prácach [9-11]. Frekvenčná závislosť magnetodielektrickej anizotropie magnetických kvapalín bola experimentálne študovaná v práci [12]. Autori práce študovali zmenu permitivity pri aplikovanom homogénnom magnetickom poli o hodnote 0,5 T orientovanom v paralelnom a kolmom smere vzhľadom na elektrické pole. Z výsledkov vyplynulo, že jav magnetodielektrickej anizotropie je výrazne závislý od frekvencie elektrického poľa. Pri nízkych frekvenciách a teplote pod bodom tuhnutia nosnej kvapaliny sa okrem medzifázovej polarizácie uplatňuje aj tzv. „hopping“ proces, reprezentovaný preskakujúcim polarónom medzi časticami susedných agregátov. Toto preskakovanie je zosilnené v prípade paralelnej konfigurácie intenzity elektrického a magnetického poľa a zoslabené pri kolmej konfigurácii. Pri vyšších frekvenciách tento proces zaniká, čo je aj príčinou výraznejšej nízkofrekvenčnej anizotropie. Autori práce [13] sa venovali štúdiu magnetodielektrických vlastností magnetických kvapalín so zameraním na ich potenciálne využitie v senzoroch elektrických a neelektrických veličín. Na základe jedného z realizovaných experimentov mohli autori odhaliť lineárny nárast reálnej permitivity s narastajúcim magnetickým poľom pri paralelnej konfigurácii intenzít elektrického a magnetického poľa a lineárny pokles pri kolmej konfigurácii.

Pre aplikácie magnetických kvapalín vo vysokonapäťovej technike je nutné poznať ich elektro-izolačné vlastnosti. Podľa fyziky dielektrík si izolanty v elektrickom poli zachovávajú izolačné

vlastnosti len do určitej hodnoty intenzity tohto poľa. Po dosiahnutí hraničnej intenzity ich odpor klesá na hodnoty odporu vodičov, a to aj vtedy, ak sa intenzita elektrického poľa ďalej nezvyšuje. Prúd tečúci dielektrikom potom narastá na hodnoty obmedzené len impedanciou zdroja napätia a prívodmi k elektródam, medzi ktorými sa dielektrikum nachádza. V dôsledku toho sa v dielektriku bude generovať teplo, ktoré spôsobí chemické a fyzikálne zmeny izolantu a následne dochádza k strate izolačných vlastností. Strata izolačných vlastností a s tým spojené javy príznačné pre úplný výboj v dielektriku sa nazývajú elektrickým prierazom (v tuhom dielektriku), resp. preskokom (u plynov a kvapalín), a napätie, pri ktorom nastáva prieraz (preskok) je prierazným (preskokovým) napätím. Toto napätie prepočítané na jednotkovú hrúbku dielektrika udáva hodnotu, ktorá sa nazýva elektrická pevnosť [14].

Pred uvažovaním elektrickej pevnosti magnetických kvapalín je dôležité poznamenať, že mechanizmus preskoku v kvapalných dielektrikách nie je v súčasnosti ešte dostatočne preskúmaný. Dopusiaľ bolo navrhnutých niekoľko modelov preskoku v kvapaline, ktorých spoločnými znakmi sú najmä prítomnosť elektrónovej lavíny a tvorba plynových bublín [15]. Experimentálna prax ďalej potvrdzuje, že na hodnotu elektrickej pevnosti kvapaliny výrazne vplyva charakter a množstvo prímiesi – nečistôt, ktoré sa nachádzajú v kvapalnom dielektriku [16]. Pridanie častíc do transformátorového oleja by teda malo mať nepriaznivé účinky na jeho elektrickú pevnosť. Napriek tomuto konštatovaniu, existujú experimentálne štúdie dielektrických vlastností magnetických kvapalín, poukazujúce na výrazne opačný efekt.

Na vylepšenie elektrickej pevnosti magnetickej kvapaliny, vzhľadom na čistý transformátorový olej, prvýkrát poukázala práca Segala a kol. [17]. Autori tejto práce skúmali elektrickú pevnosť magnetickej kvapaliny na báze transformátorového oleja a nanočastíc magnetitu. Táto kvapalina vykazovala v striedavom elektrickom poli (60Hz) porovnateľnú elektrickú pevnosť s čistým olejom, zatiaľ čo jej odolnosť voči impulznému napätiu v elektródovej konfigurácii ihlguľa bola výrazne zlepšená. V prípade ihly s kladným elektrickým potenciálom bol zaznamenaný nárast impulzného preskokového napätia až o 50% v porovnaní s čistým minerálnym olejom. Pri zápornom potenciáli na ihlovej elektróde boli preskokové hodnoty v magnetickej kvapaline a v čistom oleji približne rovnaké. Rozdielne hodnoty elektrickej pevnosti fero kvapaliny pri zápornej a kladnej ihlovej elektróde nie sú prekvapujúce. Je známe, že bežný minerálny olej má omnoho vyššiu odolnosť voči impulznému napätiu v prípade, keď ihla je zápornou elektródou [18]. Prameňom tohto rozdielu je rôznorodosť mechanizmov formovania vodivých kanálov, ktorých pozorovaním bolo potvrdené, že kladný vodivý kanál sa medzi elektródami šíri vyššou rýchlosťou ako záporný vodivý kanál [19]. Z meraní Segala a kol. vyplynulo, že prítomnosťou nanočastíc v oleji bola rýchlosť šírenia sa kladného vodivého kanálu zredukováná až o 46%. Takto spomalený vodivý kanál si vyžaduje dlhší čas na premostenie elektród, ktoré by predstavovalo elektrický preskok v kvapaline a tým aplikované impulzné napätie môže pôsobiť dlhšiu dobu. Nanočastice magnetitu teda potláčajú procesy, ktoré vedú k elektrickému preskoku.

Interakcie magnetických kvapalín s elektrickým alebo magnetickým poľom majú nezanedbateľný vplyv na ďalšie fyzikálne procesy v magnetických kvapalinách. Ako príklad môžeme uviesť fascinujúci jav termomagnetnickej konvekcie. Ten nastane vtedy, keď je magnetická kvapalina v blízkosti telesa, ktoré je zdrojom magnetického poľa a zároveň zdrojom tepla (napr. vodič s prúdom, vinutie transformátora a pod.). Keďže magnetická citlivosť

magnetickej kvapaliny klesá s rastúcou teplotou, bude teplejšia magnetická kvapalina vytlačaná studenšou a vďaka vzniknutému prúdeniu sa dosiahne väčší chladiaci účinok. Niekoľko takých experimentov vykonali aj výskumníci zo spomínaných košických pracovísk v spolupráci s Elektrotechnickým výskumným a projektovým ústavom v Novej Dubnici. Zistili, že výkonový transformátor naplnený olejovou magnetickou kvapalinou dosahuje výrazne nižšiu pracovnú teplotu ako transformátor naplnený čistým olejom. Významne zlepšenie chladenia transformátora bolo zistené aj v prípade použitia nanokvapaliny na báze transformátorového oleja a uhlíkových nanočastíc (fulerénu) [20].

#### IV. ZHRNUTIE A ZÁVER

Súčasný stav experimentálneho štúdia magnetických, dielektrických a magneto-dielektrických vlastností magnetických kvapalín svedčí o atraktívnych možnostiach ich aplikácií v priemysle. Poskytnutým prehľadom, ktorý pozostáva z vybraných vedeckých publikácií, sme poukázali na dôležitý význam výskumu magnetických kvapalín vyrobených na báze transformátorových olejov, a to najmä z hľadiska ich potenciálneho využitia v elektroenergetike.

#### POĎAKOVANIE

Táto práca bolo podporená Agentúrou na podporu vedy a výskumu v rámci projektu APVV-22-0115 a Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaM SR a SAV VEGA 2/0029/24 a NATO Science for Peace and Security Program G5683.

#### LITERATÚRA

- [1] Choi, S. U. S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in *Developments and Applications of Non-Newtonian FLows*, D.A. Singer and H. P. Wang, Eds., American Society of Mechanical Engineers, New York, FED-231/MD-66: 99-105, 1995.
- [2] Maxwell, J. C., *Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, Oxford, 1873.
- [3] Feynman, R. P. (1959). Dostupné online <https://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- [4] S. W. Charles, "The Preparation of Magnetic Fluids," in *Ferrofluids*, S. Odenbach, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 3–18.
- [5] Elmore W.C., The magnetisation of ferromagnetic colloids. *Phys. Rev.* 54, 1092-1095, 1938.
- [6] Papell, S.S., Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles. US Patent 3215572, 1965.

- [7] Rajnak, M. a kol., Direct observation of electric field induced pattern formation and particle aggregation in ferrofluids. *Appl. Phys. Lett.* 107, 073108, 2015.
- [8] A. Espurz, J. M. Alameda, and A. Espurz-Nieto, "Magnetically induced dielectric anisotropy in concentrated ferrofluids," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 22, no. 8, p. 1174, Aug. 1989.
- [9] N. A. Yusuf, J. Shobaki, H. Abu-Safia, and I. Abu-Aljarayesh, "Magneto-dielectric anisotropy in magnetic fluids determined from magneto-optical measurements," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 149, no. 3, pp. 373–379, Sep. 1995.
- [10] [88] P. Kopcansky, J. Cernak, P. Macko, D. Spisak, and K. Marton, "Dielectric behaviour of mineral-oil-based magnetic fluids-the cluster model," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 22, no. 9, p. 1410, Sep. 1989.
- [11] [89] P. Licinio, A. V. Teixeira, and J. M. A. Figueiredo, "Non-linear dielectric response of ferrofluids under magnetic field," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 289, pp. 181–183, Mar. 2005.
- [12] A. Spanoudaki and R. Pelster, "Frequency dependence of dielectric anisotropy in ferrofluids," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 252, pp. 71–73, Nov. 2002. R. Taylor, S. Coulombe, T. Otanicar, P. Phelan, A. Gunawan, W. Lv, G. Rosengarten, R. Prasher, and H. Tyagi, "Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids," *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 1, pp. 011301–011301–19, Jan. 2013.
- [13] C. Cota, "Dielectric anisotropy in ferrofluids," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 39, no. 1–2, pp. 85–87, Nov. 1983.
- [14] J. Artbauer, J. Šedovič, and V. Adamec. *Izolanty a izolácie: I. vydanie*. Bratislava: Alfa, 1966. 620 s.
- [15] W. G. Chadband, "From bubbles to breakdown, or vice-versa," in *IEEE 11th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1993., ICDL '93*, 1993, pp. 184–193.
- [16] F. Poljak, *Izolanty a dielektriká*. Bratislava: Alfa, 1983. 169 s.
- [17] V. Segal, A. Hjortsberg, A. Rabinovich, D. Nattrass, and K. Raj, "AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles," in *Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1998*, 1998, vol. 2, pp. 619–622 vol.2.
- [18] Y. Torshin, "On the existence of leader discharges in mineral oil," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, no. 1, pp. 167–179, 1995.
- [19] R. Bartnikas, *Electrical Insulating Liquids*. ASTM International, 1994.
- [20] Rajnak, M. a kol. (2022) Dielectric and thermal performance of a C60-based nanofluid and a C60-loaded ferrofluid. *Phys. Fluids* 34, 107106 (2022).

#### ADRESY AUTOROV

Michal Rajnáč, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, Košice, 04001, Slovenská Republika, [rajnak@saske.sk](mailto:rajnak@saske.sk)  
 Katarína Paulovičová, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, Košice, 04001, Slovenská Republika, [paulovic@saske.sk](mailto:paulovic@saske.sk)  
 Peter Kopčanský, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, Košice, 04001, Slovenská Republika, [kopcan@saske.sk](mailto:kopcan@saske.sk)  
 Milan Timko, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, Košice, 04001, Slovenská Republika, [timko@saske.sk](mailto:timko@saske.sk)