

Juraj Kurimský

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

## Magnetická kvapalina v slabom elektrickom poli

**Abstrakt.** V článku je popísané pozorovanie deformácie kvapky magnetickej kvapaliny na hladine silikónového oleja v mierne nehomogénnom jednosmernom elektrostatickom poli. V teoretickej časti sú objasnené základné pojmy týkajúce sa popisu deformácie kvapiek. Experimentálne jadro práce je venované trom typom meraní, založených na rovnakej metodike experimentu. V práci analyzujeme zmenu deformačného parametra v závislosti od objemovej koncentrácie magnetických nanočastíc v nosnej kvapaline, časového pôsobenia a výšky napätia.

**Kľúčové slová:** Magnetická kvapalina, deformácia kvapky, elektrokinetický model, elektrostatické pole, rozpad kvapky

### Úvod

Od objavenia magnetickej kvapaliny uplynul značný počet rokov, mnoho ľudí však ani len netuší, že suspenzia reagujúca na magnetické pole existuje. Avádzanie magnetickej kvapalín do oblasti elektrotechniky je pomerne dlhý proces, ktorý si vyžaduje rôzne experimenty a merania, pomocou ktorých môžeme ľahšie určiť, či sa účinnosť strojov a prístrojov zvýšila. Preto každá práca alebo projekt, ktorý prinesie čo i len malú informáciu týkajúcu sa magnetickej kvapaliny môže výrazne pomôcť v tejto problematike.

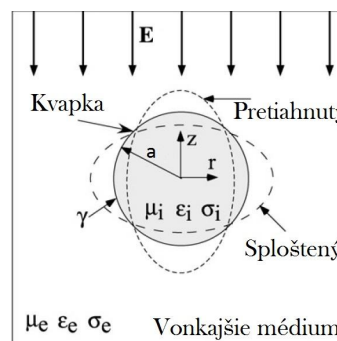
Vo svete vedy je v súčasnosti je MK relatívne dobre známy pojem, avšak pozornosť, ktorú si získala u mnohých vedcov za posledné roky, stále rastie [1]. Uplatnenie si MK našla v kozmonautike, kde sa zmiešava spolu s palivom pre raketoplány. Využíva sa aj v zdravotníctve, kde tvorí súčasť liekov, ktoré je potrebné dopraviť na miesto výskytu ochorenia [2]. Ďalším odvetvím je strojársky priemysel, kde dochádza k zavedeniu MK ako náplne do tlmivcov aut alebo rôznych hydraulických zariadení. S cieľom zvýšiť účinnosť, rôznych elektrických strojov a prístrojov, MK dostáva príležitosť uplatniť sa aj v elektrotechnike. Ide najmä o spínacie prístroje, tesnenia točivých a netočivých strojov, výkonové transformátory, magnetickej spojky, chladenie reproduktorov a mnoho ďalších [3].

V príspevku sa opierame o experimentálnu skúsenosť a pozorovanie prejavov magnetickej kvapaliny v elektrostatickom poli. Pri pozorovaní kvapky MK na hladine inej kvapaliny hľadáme odpovede najmä nasledujúce otázky: Aká je fyzikálna podstata interakcie elektrického poľa a magnetickej kvapaliny? Aký zdeformovaný tvar a spôsob rozpadu sa vyskytuje v magnetickej kvapaline umiestnenej v slabom elektrostatickom poli? Ako vplyva zmena objemovej koncentrácie magnetickej nanočastíc na priebeh deformácie v čase? Ako reaguje zmena tvaru kvapky na rastúcu intenzitu elektrického poľa?

### Deformácia kvapky

Teória zaoberajúca sa zmenou tvaru kvapky ponorenej v inej nemiešateľnej kvapaline spadá pod elektrohydrodynamiku, ktorá skúma silové interakcie medzi elektrickým poľom a elektricky polarizovanou kvapalinou. Taktiež sa zaoberá dynamikou elektricky nabitých tekutín, pohybom ionizovaných častíc alebo molekúl a ich vzájomnou interakciou v kvapalnom systéme, pomocou aplikácie elektrického poľa [4]. Na obr. 1 je schematicky znázornená deformácia kvapky suspendovanej v inej nemiešateľnej kvapaline pod vplyvom elektrického poľa o intenzite  $E$ , ktorej vodorovný smer pôsobenia je pozdĺž osi  $z$ . Kruh sivej farby predstavuje nezdeformovanú kvapku

pred aplikáciou elektrického poľa. Hodnotu polomeru nezdeformovanej kvapky charakterizuje parameter  $a$ . Prerušovanou čiarou je znázornený pretiahnutý alebo sploštený predpokladaný tvar deformácie. Relatívna permitivita ( $\epsilon_i, \epsilon_e$ ), elektrická vodivosť ( $\sigma_i, \sigma_e$ ) a viskozita ( $\mu_i, \mu_e$ ) patria medzi najzákladnejšie fyzikálne vlastnosti, ktoré ovplyvňujú deformačný proces. V niektorých zahraničných literatúrach sa uvádza aj hustota ( $\rho_i, \rho_e$ ) ako jednu z fyzikálnych vlastností. Indexy (i) a (e) sú prevzaté zo zahraničnej literatúry a definujú suspendovanú (inner) kvapku a vonkajšie (external) médium [5]. Povrchové napätie je označené  $\gamma$ , a spôsobuje zachovanie pôvodného tvaru kvapky.

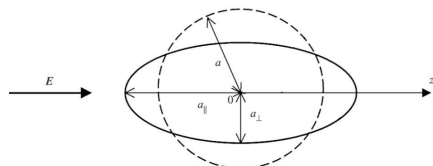


Obr.1. Suspendovaná kvapka v inej nemiešateľnej kvapaline pod vplyvom elektrického poľa [5].

Najjednoduchší spôsob výpočtu hodnoty deformačného parametra  $D$  zdeformovanej kvapky je založený na pomere kolmej a rovnobežnej dĺžky „ $a$ “ v závislosti od smeru pôsobenia elektrického poľa :

$$D = \frac{a_{\parallel} - a_{\perp}}{a_{\parallel} + a_{\perp}} \quad (1)$$

Parametre  $a_{\parallel}$  a  $a_{\perp}$  sú vzdialenosti od stredu zdeformovaného sféroidu až po jeho okraj. Ich význam nadobúda na hodnotu po určení smeru pôsobiaceho elektrického poľa medzi dvoma elektródami (Obr. 2). Z obr. 2 je možné vidieť, ako deformovaná kvapka mení svoj tvar na pretiahnutý sféroid v smere intenzity poľa. Zdeformovaný sféroid je vyznačený plnou čiarou a nezdeformovaná kvapka prerušovanou čiarou.



Obr.2. Deformácia kvapky v elektrickom poli.

### Charakterizácia tvaru kvapky

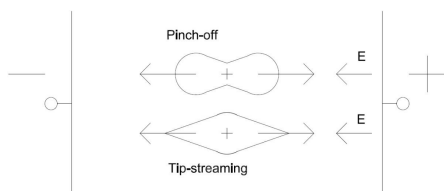
Zdeformovaná kvapka v ustálenom stave môže nadobudnúť len pretiahnutý alebo sploštený tvar. Tvar zdeformovanej kvapky sa odzrkadlí aj na hodnote deformačného parametra. Podľa matematického hľadiska vyplývajú z rovnice (1) platí [6]:

- Ak  $D > 0$ , kvapka je pretiahnutého tvaru
- Ak  $D < 0$ , kvapka je splošteného tvaru
- Ak  $D = 0$ , nedošlo k žiadnej deformácii kvapky

Avšak k takémuto tvrdeniu môžeme dôjsť len na základne experimentu a vizuálneho overenia už zdeformovanej kvapky.

### Rozpad kvapky

Situácia, kedy deformačný proces nedosiahne ustálený stav a zároveň prebieha ďalej, sa nazýva rozpad kvapky. Roztrhnutie a zničenie povrchu kvapky zväčša ovplyvňuje intenzita elektrického poľa, polomer nezdeformovanej kvapky, fyzikálne vlastnosti, povrchové napätie, a iné. Celkový proces rozpadu kvapky prebieha spočiatku ako normálny deformačný proces, avšak nevyváženosť síl neustále deformuje povrch kvapky, až do jej rozpadu. Za rozpadnutú kvapku sa považuje jedna kvapka, ktorá sa rozpadne na väčší počet menších kvapiek alebo menší počet väčších kvapiek, avšak nie väčších ako je pôvodná kvapka. Medzi dva hlavné spôsoby rozpadu kvapky v elektrostatickom poli patria pinch-off a tip-streaming [7] (Obr. 3).



Obr.3. Dva spôsoby rozpadu kvapky v elektrickom poli [7]

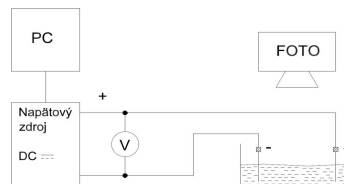
Spôsob rozpadu typu pinch-off je typický pre Newtonovské vodivé kvapky a prejavuje sa stenčením kvapky v blízkosti koncov v dôsledku povrchovej deformácie. Uzlové body sa naďalej stávajú tenšími, až dokým konce kvapky nebudú vyzerat' ako dve obrátené žiarovky. Súčasne, so zmenou tvaru koncov, dochádza k predĺženiu strednej časti kvapky. Zvyšná časť sa deformuje postupne z ktorej sa neskôr stáva štíhly valcovitý tvar. Výsledkom deformácie je deštrukcia kvapky na niekoľko malých kvapiek. Viac emulzné kvapky alebo viskoelastické kvapky ponorené do vonkajšieho média, sa deformujú spôsobom tip-streaming, kedy sa v dôsledku vplyvu elektrického poľa oslabí povrchové napätie na koncoch kvapky. Následne dochádza k vytvoreniu hrotov s malým pomerom zakrivenia. Z hrotov vzniká tenký pás kvapaliny smerujúci k elektróde. Záverečná fáza tip-streamingu pokračuje predĺžovaním hrotov do dĺžky, smerom k elektródam, čo rozloží kvapku na úzky pás, ktorý tvorí veľké množstvo malých kvapiek. Podľa Sherwooda [8] vysoká pravdepodobnosť rozpadu kvapky prostredníctvom tip-streamingu môže nastať pri kvapalných systémoch s

vysokou pomernou hodnotnou relatívnej permitivity  $S$ , čo sa zároveň vzťahuje aj na MK.

### Experimentálna časť a výsledky

Porovnávali sme tri koncentrácie MK :0,95 %, 0,65 %, 0,35 % a 0,15 % pri intenzite 8 kV/M.

Na obr. 4 je schéma zapojenia meracieho obvodu, kde písmeno V značí voltmeter. Označenie kladnej a zápornej elektródy a svoriek jednosmerného napätového zdroja je realizované znamienkami + a -.

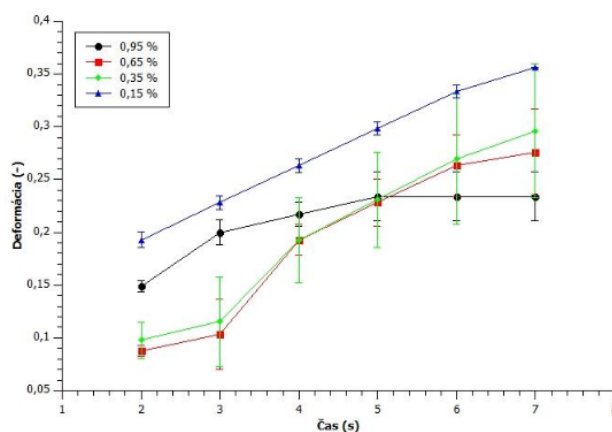


Obr.4. Náčrt experimentálneho pracoviska

Keďže k dispozícii nebol žiaden prístroj alebo špeciálny kamerový systém, ktorý by dokázal samostatne určiť veľkosť deformujúcej sa kvapky v istom čase, bola zavedená vyhodnocovacia metóda pomocou pixelov. Táto metóda spočíva vo využití najmenej jednotky digitálnej bitmapovej grafiky, ako základnú jednotku dĺžky. K získavaniu obrázkov, resp. frejmov, zdeformovanej kvapky MK dokonale poslúžil program, pomocou ktorého sa z video záznamu v danej sekunde vystrihol obrázok. Spomínaný program prehrával celý video záznam spolu so zvukovou stopou. Za využitia hlasových poznámok "štart" a "stop" bolo možné určiť, kedy deformačný proces začal, alebo bol zastavený. Potom bola snímka uložená do počítača vo formáte jpeg. V každom video zázname bola obsiahnutá malá štvorcová plocha s rozmermi 1x1 mm pomocou, ktorej sa určil prevod skutočnej dĺžky a šírky kvapky k hodnote jedného pixelu fotky.

Reprodukovateľnosť veľkosti kvapiek bola 78% pri priemere 3 mm.

Zmena deformačného parametra MK bola vyhodnotená v časovom intervale od 2 s až po 7 s. Po tomto čase došlo k totálnemu rozpadu alebo ustálenému stavu každej pozorovanej kvapky. Analýza rozvoja deformácie MK rôznych objemových koncentrácií je na obr. 5.



Obr. 5 Rozvoj deformácie MK počas 7 sekúnd od aplikácie E-poľa.

Z grafu vidieť ako od 5 sekundy sa deformácia s rastúcou koncentráciou znižuje. MK s najvyššou koncentráciou vykázala ako jediná „ustálený stav“ v rozvoji deformácie.

### Záver

Napriek tomu, že všetky experimentálne pokusy prebehli v bezproblémovo, a na základe toho bolo možné vyvodiť jednoduché závery, treba poznamenať, že experimentálna časť bol realizovaná s minimálnymi prostriedkami, ktoré sú ľahko dostupné. Pri ďalších experimentoch je možné poukázať na predpovedanie rozvoja deformácie na základe získaných obrazcov a proces analýzy automatizovať.

### PodĎakovanie



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.

Táto práca bola podporená projektami VEGA 2/0141/16, a 1/0340/18.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0438, Zmluvy č. APVV-17-0372. a Zmluvy č. APVV-18-0160.

### Literatúra

- [1] ROSENSWEIG, R. 1987. Magnetic fluids. [online]. New Jersey : Annual reviews, 1987. [cit. 2016-4-7] Dostupné na internete: <[http://pages.csam.montclair.edu/~yecko/ferro/oldpapers/DIRECTORY\\_Fundamentals\\_Reviews/Rosensweig\\_MagneticFluids\\_ARFM87.pdf](http://pages.csam.montclair.edu/~yecko/ferro/oldpapers/DIRECTORY_Fundamentals_Reviews/Rosensweig_MagneticFluids_ARFM87.pdf)> .
- [2] FOJTŮ, M. 2012. Využití magnetických mikro - a nanočástic v nádorové diagnostice : bakalárska práca. Brno : MU, 2012. 66s.
- [3] ČESKÝ, J. 2014. Využití magnetických kapalin v elektromechanických systémech: diplomová práca. Plzeň : ZČU, 2014. 72 s.
- [4] CHEN, Ch. H.: Electrohydrodynamic Instabilities. Dept. Mechanical Engineering and Materials Science Duke University, Durham 2009.
- [5] SUPEENE, G. et al.: Deformation of a droplet in an electric field: Nonlinear transient response in perfect and leaky dielectric media. In: Journal of Colloid and Interface Science. 2007, s. 463-465.
- [6] ROZYNEK, Z. et al.: Electric field manipulation of particles in leaky dielectric liquids. In: Archives of Mechanics. 2015, s. 385-399.
- [7] HA, J. W. - YANG, S. M.: Effect of Nonionic Surfactant on the Deformation and Breakup of a Drop in an Electric Field. In: Journal of Colloid and Interface Science. 1998, s 195-204.
- [8] HERWOOD, J. D.: The deformation of a fluid drop in an electric field: a slender-body analysis. In Journal of Physics A: Mathematical and General. 1991, s. 4047-4053.

**Autor:** Juraj Kurimský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [juraj.kurimsky@tuke.sk](mailto:juraj.kurimsky@tuke.sk)