

## Analýza $I(t)$ závislosti počas štrukturalizácie magnetických nanočastíc v magnetickej kvapaline

Marton K. – FEI TU Košice, Tomčo L. – LF TU Košice, Cimbala R. – FEI TU Košice, Koneracká M., Kopčanský P., Timko M. – UEF SAV Košice

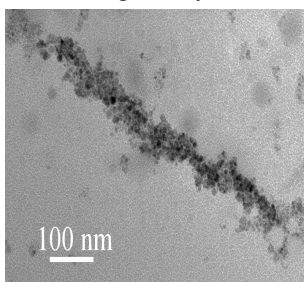
### Anotace

The previous experiments were devoted to observation of structuralization processes in magnetic fluids in dependence on time at constant value of homogenous magnetic fields. The average value of clusters of magnetite particles reached stabilized length that depended on volume concentration of magnetite particles in magnetic fluids. This work is oriented on observation and explanation of anomaly on dependences of current intensity ( $I$ ) on time ( $t$ ) in magnetic fluids with help of observation of structuralization processes results at respecting of space charge. This anomaly was detected at upper concentration of magnetite particles ( $>1\%$ ) on  $I(t)$  dependences in given time region that characterizes the change of energetic conditions in magnetic fluids.

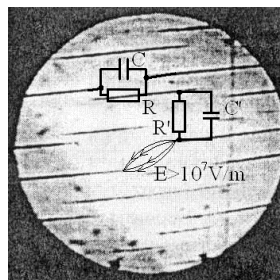
### ÚVOD

Bolo dokázané [1], že po aplikácii magnetického poľa dochádza v magnetickej kvapaline (MK) k zhlukovaniu magnetických nanočastíc ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -

magnetit) a vytváraniu tzv. klastrov, ktoré majú podobu retiazok (obr.1). Veľkosti klastrov závisia od objemovej koncentrácie magnetitových nanočastíc v magnetickej kvapaline a po určitej dobe (približne 80-100 s) dosahujú maximálne hodnoty.



1a)

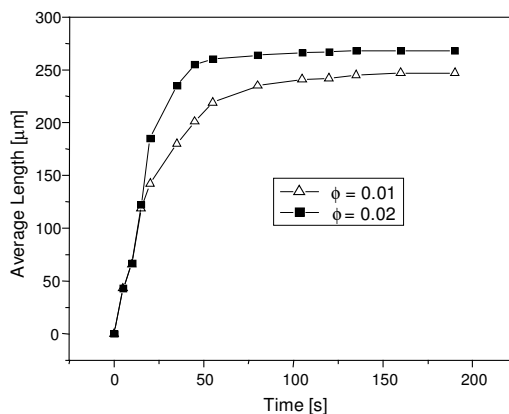


1b)

Obr. 1: Klastre magnetických nanočastíc pozorovaných elektrónovým (1a) a optickým mikroskopom (1b).

V [5] bola sledovaná štrukturalizácia magnetických častíc pomocou optického mikroskopu. Pozorované boli závislosti priemernej dĺžky klastrov od času pri

rôznych koncentráciách magnetitových nanočastíc (obr.2).



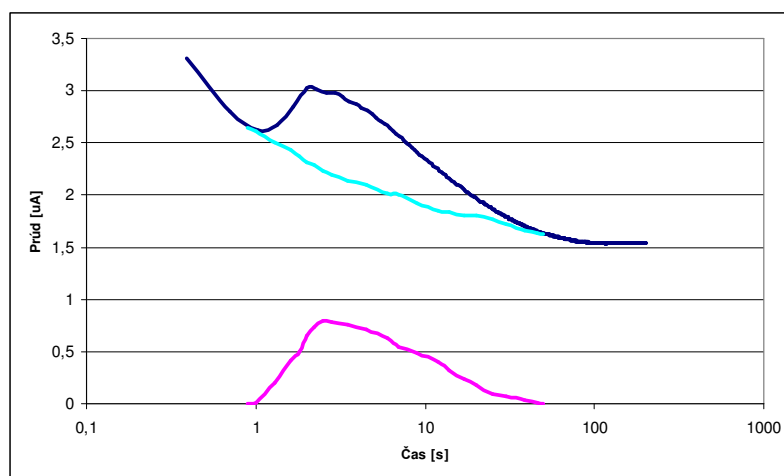
Obr. 2: Závislosť priemernej dĺžky klastrov nanočastíc od času pri  $B = 10 \text{ mT}$ .

Cieľom tejto práce bolo sledovanie súvislosti medzi štrukturalizačnými javmi v magnetickej kvapaline a jej elektrickou vodivosťou pri pôsobení kombinovaného elektrického a magnetického poľa.

# VODIVOSŤ MAGNETICKÝCH KVAPALÍN VO VZŤAHU K ŠTRUKTURALIZÁCIÍ NANOČASTÍČ

V experimentoch boli sledované vodivostné pomery v magnetickej kvapaline pri objemových koncentráciách ( $\square$ ) v intervale od 0,19 % do 3,2 % pri jednosmernom a striedavom napätí [2]. Jav magnetodielektrickej anizotropie bol meraný pri rôznych orientáciách elektrického a magnetického poľa ( $B = 0$ ,  $E \parallel B$  a  $E \perp B$ ) a pri premenlivej hodnote elektrického poľa. Elektrická vodivosť magnetických kvapalín po prekročení 1% objemovej koncentrácie

stúpala miernejšie ( $\left(\frac{d\gamma}{dc}\right)_{1\%} < \left(\frac{d\gamma}{dc}\right)_{0,5\%}$ ), pričom sa zreteľnejšie prejavila magnetodielektrická anizotropia. Meranou veličinou bol elektrický prúd tečúci magneticou kvapalinou, ktorý je úmerný jej vodivosti. Pozorovaná bola anomália na  $I(t)$  závislosti, ktorá pri konštantnom napätí v určitej časovej oblasti súvisela s procesom vzniku, rastu a stabilizácie reťazok magnetických častíc v aplikovanom magneticom poli (obr. 2). Pribeh závislosti  $I(t)$  veľmi citlivo reaguje na elektrofyzikálne zmeny v MK, čo sa prejavuje najmä pri dynamike formovania klastrov prudkým nárastom prúdu a jeho následným poklesom na hladinu vodivostného prúdu.



Obr. 3: Časová závislosť jednosmerného elektrického prúdu tečúceho magneticou kvapalinou ( $\Phi = 1\%$ ,  $d = 0,1$  mm,  $E \parallel B$ ,  $E = 106$  V/m,  $B = 40$  mT).

Matematický sa tento jav dá vyjadriť súčtom dvoch rovníc vyjadrujúcich exponenciálny priebeh prúdu, ktorý je daný sumáciou prúdov jednotlivých zložiek magnetickej kvapaliny [3]

$$i_c = \frac{U}{R_i} + \sum_{i=1}^n I_{m_i} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (1)$$

kde  $i_c$  je celkový prúd ako makroskopický prejav na sebe nezávislých polarizačných procesov v izolačnej kvapaline,  $U$  je aplikované jednosmerné napätie,  $R_i$  je izolačný odpor po nekonečne dlhom čase,  $I_{m_i}$  je amplitúda  $i$ -tej zložky elementárneho prúdu a  $\tau_i$  je časová relaxačná konštanta  $i$ -tej zložky prúdu.

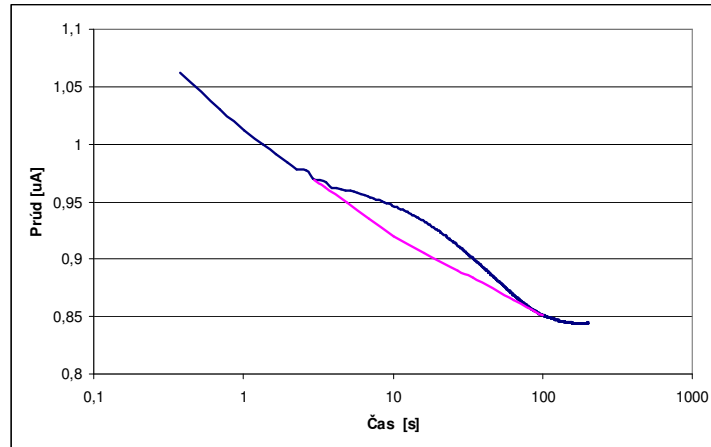
Matematicko-fyzikálnou analýzou bolo dokázané, že funkcia superponovaná na sumáciu

exponenciálnych závislosti sa dá vyjadriť vzťahom [4]

$$i(t) = I_0 \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_1}} + e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right), \quad (2)$$

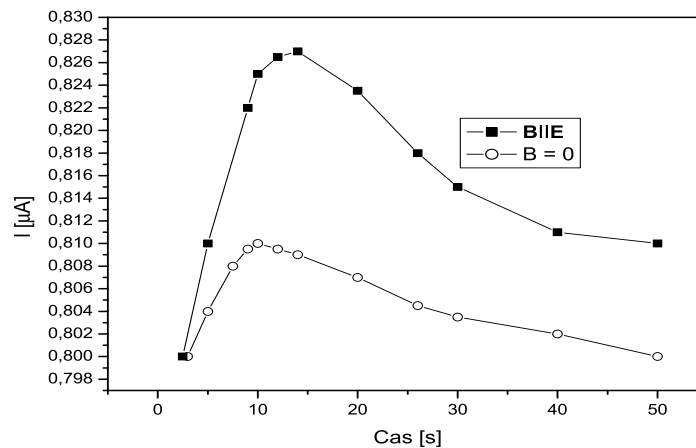
kde  $I_0$  je amplitúda „dlhej“ impulznej vlny a  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  sú časové konštanty. Táto rovnica vyjadruje prúdovú impulznú vlnu s aperiodickým priebehom a bola zostavená na základe RLC modelu sledovaného obvodu. Uvedená úvaha platí pre oblasť na rozhraní slabých (106 V/m) a silných (107 V/m) elektrických polí.

Ak proces sledujeme v slabom (neionizujúcom) elektrickom poli, tak anomália na  $I(t)$  závislosti je málo výrazná (obr. 4). Analýza tiež ukázala príspevok prúdovej impulznej vlny.



Obr. 4: Anomália na  $I(t)$  závislosti pri  $E = 105 \text{ V/m}$  ( $\Phi = 1\%$ ,  $B = 40 \text{ mT}$ ,  $E \parallel B$ ).

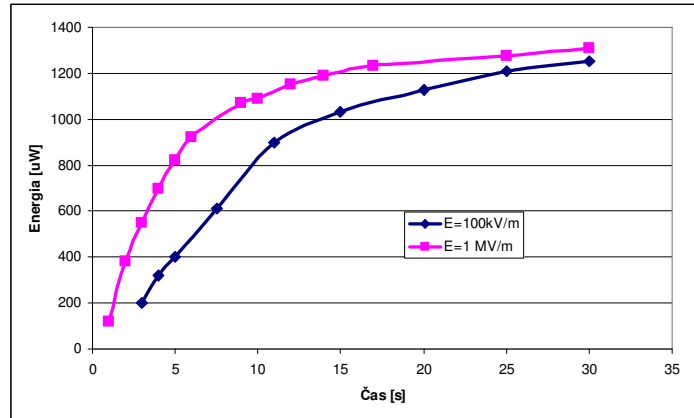
Pred začiatkom vzniku klastrov bolo pozorované zvlnenie na  $I(t)$  závislosti, čo je spôsobené počiatku „nepokoja“ počas usporadúvania sa magnetických častíc. Amplitúda  $I_0$  oproti svojej predchádzajúcej hodnote bola znížená približne na polovicu (obr. 5).



Obr. 5: Príspevok  $I(t)$  závislosti ku vzniku anomálie pri rôznych polohách vektorov  $E$  a  $B$ , vzdialenosti  $d = 1 \text{ mm}$  a  $E = 105 \text{ V/m}$ .

Ďalšia etapa výskumu bola venovaná sledovaniu energie vynaloženej na proces štrukturalizácie. Skúmaná bola magnetická kvapalina s koncentráciou 1 % v homogénnom magnetickom poli ( $B = 40 \text{ mT}$ ) pri dvoch hodnotách elektrického poľa  $E_1 = 106 \text{ V/m}$  a  $E_1 = 105 \text{ V/m}$ . Priebiehy  $W_{es} = f(t)$  sú znázornené na obr. 6. Je zrejmé, že na začiatku štrukturalizačného procesu pri  $E \parallel B$  bol zaznamenaný prudký nárast

energie  $W_{es}$ , ktorý je spojený so spontánnym formovaním sa nanočastíc do klastrov v časovom intervale 1-6 s. Po tomto čase sa dĺžka klastrov postupne stabilizuje a dochádza ku saturácii energie, čo zodpovedá pozorovanej časovej závislosti rastu klastrov (obr. 2).



Obr. 6: Časová závislosť energie v priebehu štrukturalizácie ( $\Phi = 1 \%$ ,  $d_1 = 0,1\text{mm}$ ,  $d_2 = 1 \text{ mm}$ ,  $E_1 = 105 \text{ V/m}$ ,  $E_2 = 106 \text{ V/m}$ ,  $B = 40 \text{ mT}$ ).

## ZÁVER

Bola vyslovená hypotéza, podľa ktorej štrukturalizácia magnetických nanočastíc v magnetickej kvapaline umiestnenej v homogénnom magnetickom poli je v súlade s transportnými javmi prebiehajúcimi v nej pri prechádzaní elektrického prúdu. Doba pozorovaných anomálií na  $I(t)$  závislostiach v magnetických kvapalinách je v súlade s dobou tvorby klastrov v nich. Tieto javy sú pozorované aj v neprítomnosti magnetického poľa. Ich analogické účinky súvisia s mobilitou elektricky nabitých častíc, ktoré pri svojom pohybe sa stávajú zdrojmi elementárnych magnetických polí. Pri vyššej objemovej koncentrácii magnetitových častíc sa pozorovaný jav zosilňuje. Pri nižších koncentráciách ( $\Phi < 1 \%$ ) sa v magnetickej kvapaline neuplatňujú väzby medzi časticami, čo má podstatný vplyv na ich vlastnosti. Popísaná anomália na  $I(t)$  závislostiach v týchto kvapalinách nebola pozorovaná.

## PODAKOVANIE

Autori článku vyslovujú podakovanie za účinnú podporu grantovým agenturám MS SR a SAV v rámci výskumu

VEGA 1/0368/09, VEGA 2/0077/09 a APVV 0509 - 07.

## LITERATÚRA

- [1] [1] Tomčo L, Marton K, Herchl F, Kopčanský P, Potočová I, Koneracká M, Timko M: *Physica Status Solidi (c)* Vol. 3, no. 1, p. 195, 2006.
- [2] Marton K, Tomčo L, Herchl F, Cimbala R, Koneracká M, Kopčanský P, Timko M: *Konduktivita magnetických kvapalín na báze transformátorového oleja*, Zborník „Nové smery v diagnostike elektrických strojov“, FE ŽU Žilina, 2008.

- [3] Cimbala R: *Starnutie izolačných systémov*, Vydavateľstvo TU, Košice, 188 str., 2007.
- [4] Marton K: *Proc.43. Internat.Wiss.Colloquium*, Band 4., Seite 281, TU ILMENAU, 1998.
- [5] Tomčo L: *Habilitačná práca*, PF UPJŠ, Košice, 2008.

## Autori

prof. Ing. Karol Marton, DrSc.; doc. Ing. Roman Cimbala, PhD.; Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University, Letná 9, 042 00 Košice, Slovakia; e-mail: [Karol.Marton@tuke.sk](mailto:Karol.Marton@tuke.sk), [Roman.Cimbala@tuke.sk](mailto:Roman.Cimbala@tuke.sk)

doc. RNDr. Ladislav Tomčo, PhD.; Faculty of Aeronautics, Technical University, Rampová 7, 041 21 Košice, Slovakia; e-mail: [Ladislav.Tomco@tuke.sk](mailto:Ladislav.Tomco@tuke.sk)

Ing. Martina Koneracká, CSc.; doc. RNDr. Peter Kopčanský, CSc.; RNDr. Milan Timko, CSc.; Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Sciences, Watsonova 47, 040 01 Košice, Slovakia; e-mail: [konerack@saske.sk](mailto:konerack@saske.sk), [kopcans@saske.sk](mailto:kopcans@saske.sk), [timko@saske.sk](mailto:timko@saske.sk)