

Využitie magnetickej kvapaliny v elektrotechnike - vysokofrekvenčný transformátor

Use of Magnetic Fluid in Electrical Engineering - High Frequency Transformer

Ján Kaňuch

jan.kanuch@tuke.sk

Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská Republika

Abstrakt — V tomto príspevku sú v prvej časti stručne opísané základné a magnetické vlastnosti magnetických kvapalín. Predstavuje niektoré aplikácie magnetických kvapalín v elektrotechnike, ale aj mechaniky a iné oblasti. Ďalšia časť popisuje merania s použitím magnetickej kvapaliny. Transformátor s jadrom z magnetickej kvapaliny bol navrhnutý a skonštruovaný. Prvé meranie sa uskutočnilo na transformátore s ferrofluidovým jadrom pre rôzne frekvencie napájacieho napätia. Pre porovnanie bol premeraný ten istý transformátor, ale jadro bolo nahradené feritom.

Kľúčové slová — *magnetická kvapalina, vysokofrekvenčný transformátor, feritové jadro, vyššie harmonické, meranie.*

Abstract — In the paper are in the first part briefly describes the basic and magnetic properties of magnetic fluids. It presents some applications of magnetic fluids both in electrical engineering, but also mechanics and other fields. The next part describes of measurements with using of magnetic fluid. The transformer with a core of magnetic fluid was designed and constructed. The first measurement was made at the transformer with the ferrofluid core for different frequencies of the supply voltage. For comparison the same transformer was measured, but the core was replaced by ferrite.

Keywords — *magnetic fluid, high frequency transformer, ferrit core, higher harmonics, measurement.*

I. ÚVOD

Magnetické kvapaliny sú charakteristické mnohými zaujímavými vlastnosťami, ktoré umožňujú rôzne technické aplikácie a priťahujú tak pozornosť rozličných vedeckých odborov (v súčasnosti je okolo 3000 patentov a 6000 vedeckých prác týkajúce sa magnetických kvapalín). Magnetické kvapaliny boli vyvinuté v 60-tych rokoch dvadsiateho storočia v NASA pre riadenie toku tekutého paliva kozmických rakiet magnetickým poľom v bezváhovom stave. Dnes sa pre tento účel už nepoužívajú, ale našli využitie v mnohých ďalších oblastiach.

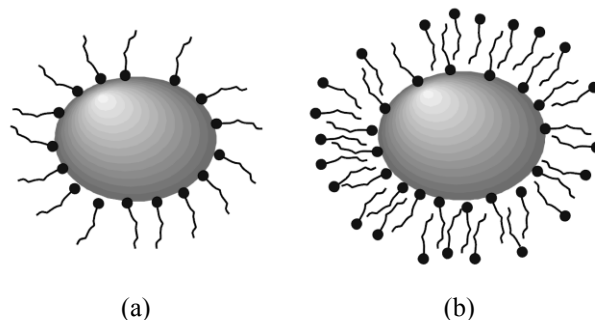
Magnetické kvapaliny sú vyrábané s rôznym zložením a pre rôzne účely použitia. Pretože veľmi dobre vedú teplo, tak sa používajú pri strojnóm obrábaní, podobne ako iné podobné suspenzie, čo sa dá použiť súčasne na chladenie aj mazanie. Ako mazivo sa využívajú z dôvodu, pretože oproti bežným mazivám je možné magnetickú kvapalinu udržať v miestach, ktoré majú byť mazané, pomocou magnetického poľa, čo sa dá využiť napr. na mazanie a tesnenie ložísk hriadeľov. Magnetická kvapalina sa využíva napr. aj na chladenie cievok niekto-

rých reproduktorov pre stredné a vysoké frekvencie. Ďalšou zaujímavou aplikáciou je možnosť nahradenia transformátového oleja magneticou kvapalinou v transformátoroch vysokého napätia [1]. Magnetické kvapaliny sa používajú tiež aj na tesnenie ultravakuumových (UHV) aparátúr. V súčasnosti veľmi široké uplatnenie má magnetická kvapalina hlavne v medicíne.

II. CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH KVAPALÍN

Vo všeobecnosti magnetické kvapaliny bývajú označované ako koloidné ferokvapaliny alebo ferrofluida a sú to suspenzie veľmi jemných feromagnetických alebo ferimagnetických nanočastíc v základnej, teda nosnej kvapaline. Ferrofluid je v podstate tekutá suspenzia z magnetických nanočastíc (o rozmeroch menej ako 10 nm), povrchovo aktívnej látky (tenzidu) a rozpúšťadla (napríklad oleja), kde magneticou zložkou je väčšinou hematit alebo magnetit.

Každá z nanočastíc predstavuje miniatúrny permanentný magnet a spolu vytvárajú Weisssove domény tj. spontánne zmagnetizované oblasti vo feromagnetiku, ich orientácia je rôzna podľa magnetického poľa. Nanočastice reagujú na magnetické pole. Na povrchu nanočastíc sa nachádza aj detergent tj. makromolekulárny obal. Detergenty sú oveľa menšie ako magnetické nanočastice a vyvolávajú medzi nimi odpudivé sily. Sú tvorené dlhými reťazcami molekúl a jedným koncom sú pevne viazané s magneticou nanočasticou (Obr. 1). Druhý koniec je voľný a je priťahovaný molekulami nosného média. Dĺžka jedného detergentu je okolo 1 až 2 nm. Vplyvom detergentov má magnetická kvapalina koloidnú stabilitu, čiže nedochádza k zhlukovaniu feromagnetických nanočastíc [2, 3].



Obr. 1. Magnetická nanočastica s detergentnými reťazcami nepolárnom prostredí (a) a v polárnom prostredí (b)

V typickej magnetickej kvapaline sa nachádza 5-10% magnetických nanočastíc, 10% surfaktantu (teda detergentov) a zvyšok tvorí nosná kvapalina.

Jednou z troch základných zložiek magnetickej kvapaliny je teda surfaktant. Hlavnou úlohou surfaktantu je udržanie konzistencie koloidnej suspenzie tým, že obaľuje fero kvapalínovú časticu tak, aby sa samotné častice nemohli k sebe priblížiť. Surfaktant môže byť buď biokompatibilný (pre biomedicínske aplikácie) alebo olejový (pre priemyselné aplikácie). Ako surfaktant sa môže použiť kyselina laurová, oelát sodný, olejová kyselina alebo PEG.

Sú možné dve usporiadania molekúl surfaktantu a nosnej kvapaliny [4]:

- magnetická častica v nepolárnom prostredí,
- magnetická častica v polárnom prostredí.

V nepolárnom prostredí stačí jedna vrstva surfaktantu, zatiaľ čo pri polárnom prostredí je potrebná druhá vrstva surfaktantu, ktorá je orientovaná nepolárnou časťou k nepolárnej časti prvej vrstvy surfaktantu (Obr. 1b).

Chemické a mechanické vlastnosti magnetickej kvapaliny určuje nosná kvapalina a jej magnetické vlastnosti určujú nanočastice a ich koncentrácia. V tabuľke 1 sú uvedené základné dostupné fyzikálne parametre jednej z bežne na trhu dostupnej magnetickej kvapaliny typu EFH1.

TABUĽKA 1 ZÁKLADNÉ FYZIKÁLNE PARAMETRE KOMERČNEJ FEROKVAPALINY EFH1

Parameter	Hodnota
Saturácia	0,4 T
Počiatočná magnetická susceptibilita	1,7
Teplota vzplanutia	92° C
Teplota tuhnutia	-94° C
Výparnosť (1 hod., 50°C)	9%
Hustota	1,21 g/ml
Dynamická viskozita	0,006 Pa.s (pri 27°C)
Povrchové napätie	29.103 N.m ⁻¹
Nosná kvapalina - ľahký minerálny olej	

III. APLIKÁCIE MAGNETICKÝCH KVAPALÍN

Výskum magnetických kvapalín je multidisciplinárny. Biológovia a lekári skúmajú biomedicínske možnosti ich využitia v medicíne a pri výskume v biologickej oblasti. Fyzici študujú ich fyzikálne vlastnosti a spracovávajú a navrhujú teórie, ktoré ich vysvetľujú. Inžinieri skúmajú ich využiteľnosť a používajú ich v niektorých výrobkoch. Väčšina aplikácií magnetických kvapalín je založená na nasledujúcich vlastnostiach:

- presúva sa tam, kde je najsilnejšie magnetické pole a zostane tam,
- absorbuje elektromagnetickú energiu pri určitých frekvenciách a zahrieva sa,
- mení fyzikálne vlastnosti v závislosti od veľkosti magnetického poľa.

Široké uplatnenie magnetických kvapalín je možný nielen v elektrotechnike, ale aj napr. v strojárstve, medicíne a dokonca aj v astronómii. Magnetické kvapaliny umožnili zostrojiť nie len nové prístroje a zariadenia s výnimočnými vlastnosťami ale boli vyvinuté aj celkom nové technológie, ktoré sú v mnohých ohľadoch výhodnou alternatívou k doterajším. Niektoré aplikácie, ktoré sú dnes vo vývoji a ešte nepredstavujú prelomové objavy, určite budú v budúcnosti vďaka pozoruhodným vlastnostiam magnetických kvapalín súčasťou originálnych projektov.

V nasledujúcich častiach si v krátkosti popíšeme a okomentujeme niektoré z týchto aplikácií.

A. Technologické aplikácie

Z mnohých technologických aplikácií magnetických kvapalín vymenujeme štyri hlavné kategórie:

a) dynamické tesnenie - v mnohých zariadeniach existujú napr. dva priestory, ktoré musia byť hermeticky izolované od seba, ale pritom hriadeľ musí preniesť energiu (rotáciu) z jedného prostredia do druhého. Napríklad motor musí byť na otvorenom mieste, zatiaľ čo hriadeľ musí ísť z neho na absolútne čisté miesto, kde sa musí niečo otáčať. Preto je potrebné hermeticky uzavrieť otvor, cez ktorý prechádza hriadeľ. Toto sa dosiahne vytvorením otvoru vo vnútri magnetu a hriadeľom z mäkkého magnetického materiálu. Drážka, ktorá je v hriadeľi, je naplnená ferrofluidom, ktorý je udržiavaný na mieste magnetickým poľom magnetu. Ferrofluid bráni prechodu akýchkoľvek nečistôt, ale ponecháva hriadeľ voľný na otáčanie [5].

b) rozptyľovanie tepla - jedným zo spôsobov chladenia zariadenia, ktoré sa pri práci veľmi ohrieva je odvod tepla pomocou dobrého vedenia tepla na určitú časť zariadenia na to určenú, ktorá s určitou hmotnosťou má oveľa väčšiu tepelnú kapacitu a možno aj oveľa väčšiu otvorenú plochu na rozptýlenie tepla. V niektorých prípadoch dobrý vodič tepla nesmie byť pevný, pretože by zablokoval prevádzku zariadenia (napr. ak zariadenie má vibrovať). Jedným zo spôsobov, ako dosiahnuť požadovaný cieľ, je použitie ferrofluidov ako tepelného vodiča. Dobrým príkladom je reproduktor, ktorého cievka sa ohrieva funkciou a ferrofluid sa udržiava na mieste magnetickým poľom magnetu, ktorý je upevnený na zvukovom reproduktore. V súčasnosti je väčšina vysokovýkonných reproduktorov vybavená ferrofluidom. Magnetické častice zabezpečujú udržanie kvapaliny na mieste, zatiaľ čo olejová zložka odvádza teplo. Prítomnosť tekutiny okolo cievky zlepšuje kvalitu reproduktora, pretože znižuje nežiaduce rezonancie, čo by spôsobilo veľmi nepríjemný zvuk [6, 7].

c) tlmenie - zotrvačný a viskózný tlmič – vyššie sme spomenuli, že magnetické kvapaliny sa používajú aj ako tlmiče v reproduktoroch. Priame použitie na tlmenie nechcených vibrácií je spojené s ich používaním ako zotrvačných a viskózných tlmičov pre motory, hlavne krokové. Na tento účel sa používa jedinečná vlastnosť magnetických kvapalín, ktorá sa vytvára a je udržiavaná magnetom. Hustota hmoty na povrchu je väčšia ako hustota tekutiny, na ktorej táto hmota pláva s časťou svojho objemu je aj nad povrchom tekutiny. Bežný krokovým motorom môže vytvárať vibrácie a aj vibračný akustický šum. Tlmič z magnetickej kvapaliny, ktorý sa pripojí k hriadeľu motora absorbuje nežiaduce vibrácie a taktiež vytvára krútiaci moment, ktorý je proti oscilačnému pohybu. Tlmič má nemagnetický kryt a vo vnútri môže byť aj zotrvačná hmotnosť, ktorá levituje nad ferrofluidom a takto sa môže vytvoriť aj magnetické ložisko [8].

B. Vysokofrekvenčný transformátor

Pri tradičných vysokofrekvenčných transformátoroch s s feritovým jadrom sa vplyvom hysterézie najmä pri vysokých frekvenciách. Preto bol vyvinutý a testovaný je aj vysokofrekvenčný transformátor s jadrom z magnetickej kvapaliny. Vysokofrekvenčný transformátor bol odsimulovaný a zmeraný s frekvenciou napájacieho napätia od 100kHz do 100 MHz. Výsledky experimentálnych meraní potvrdili, že jadro z magnetickej kvapaliny zvyšuje indukčnosť cievok a zvyšuje sa aj koeficient vzájomnej indukčnosti. Pritom bolo zistené, že tiež sa zvyšuje aj časové oneskorenie medzi magnetickým poľom a magnetizáciou jadra [3].

C. Tlmiče s magneticou kvapalinou

Tlmiče s magneticou kvapalinou (resp. ferohydraulické tlmiče) menia kinetickú energiu nežiaducich výchyliek alebo kmitanie tlmených súčastí na tepelnú energiu. Klasické hydraulické tlmiče väčšinou majú za prevádzky konštantné tlmenie, alebo sa tlmenie môže meniť reguláciou prietoku oleja škrtiacim ventilom, ktorý môže byť riadený mechanicky alebo elektricky. Pri tlmičoch s magneticou kvapalinou sa prúdovým signálom privedeným do cievky tlmiča indukuje magnetické pole, ktoré mení viskozitu magnetickej kvapaliny, čím sa mení aj tlmenie. Tieto tlmiče boli už použité pri rôznych zariadeniach, od jemných meracích prístrojov, automatických práčok, ako aj pre sedadlá nákladných aut. Klasické tlmiče reagujú za dobu asi 15 ms a vtedy auto pri bežnej rýchlosti 70 km/hod prejde dráhu približne 30 cm, kým tlmič zareaguje. Ale ferohydraulický tlmič reaguje podstatne rýchlejšie a to za dobu asi 5 ms. V tomto prípade reaguje tlmič už po prejení dráhy 10 cm a auto sa preniesie cez nerovnosti terénu bez "kolísaní". Dokonalejšie tlmenie nielenže zabráňuje prenosy vibrácií do kabíny, ale hlavne obmedzuje „odsakovanie“ kolies a tým stratu adhézie medzi pneumatikou a vozovkou čo v konečnom dôsledku zvyšuje stabilitu vozidla [3, 9].

D. Adaptívna optika

Ak ďalekohľadom zo Zeme pozoruje svetlo z vesmíru, tak vzhľadom na jeho prechod atmosférou, je toto svetlo skreslené kvôli vlneniu vzduchu, rozličné tepelné vrstvy zalamujú svetelné lúče rozličnými smermi a obraz hviezdy sa bude javiť ako rozmazaný. Jedným z riešení tohto problému sú adaptívne zrkadlá s magneticou kvapalinou, ktoré budú súčasťou veľkých ďalekohľadov. Na takomto zrkadle je systém cievok pripravených na zadnú časť zrkadla, ktoré upravujú tvar magnetickej kvapaliny a teda aj zrkadla podľa určitého algoritmu [10, 11].

Nakoľko magnetická kvapalina veľmi zle odráža svetlo (okolo 4 %), je potrebná vrstva inej látky (napríklad striebra), ktorá ma vyššiu reflexivitu. Adaptívna optika ďalekohľadu umožňuje korigovať optické vlastnosti ďalekohľadu, čím dokážeme získavať ostrejšie obrazy galaxií, hviezd či dokonca aj exoplanét.

E. Separátory neferozných kovov

Na jave hydrostatickej levitácie neferozných kovov v magnetických kvapalinách sú založené separátory neferozných kovov z odpadových surovín. Odpad tvorený zmesou neferozných kovov o rôznych špecifických hmotnostiach (napr. olovo, meď, zinok a pod.) je vložený do separačnej komory naplnenej magneticou kvapalinou. Budiaci prúd elektromagnetu je možné regulovať intenzitu nehomogénne magnetického poľa v komore. Na jednotlivé neferozné telesá pôsobí nie len levitačná

sila, ale aj gravitácia a tak pri určitej intenzite magnetického poľa vyplávajú určité telesá na hladinu.

IV. VYSOKOFREKVENČNÝ TRANSFORMÁTOR – NÁVRH A MERANIE

Vysokofrekvenčné transformátory pracujú s napätím o frekvencii nad 1 kHz. Rozmery transformátora sú závislé na výkone a frekvencii. Čím je vyššia frekvencia tým je menšia veľkosť transformátora. Pracovné frekvencie sú zvyčajne od 20 do 200 MHz. Ako základný materiál pre jadro transformátora sa dnes používa ferit a to vďaka vysokej permeabilite. Feritové jadro sa zvyčajne skladajú z oxidu železitého s kombináciou niklu, zinku a mangánu. Zložením sa ovplyvňuje permeabilita, straty, teplotná závislosť permeability a strát. Magnetické vlastnosti spoluurčuje aj technológia výroby, ktorou sa dosahujú vhodné veľkosti kryštálov v polykryštalickom materiáli a zložení medzikryštalických vrstiev. Frekvenčný rozsah feritov je do 200 MHz.

A. Návrh vysokofrekvenčného transformátora

Prvý krok je výber správneho jadra pre transformátor. Ak S_j je prierez jadra a S_v je plocha okna pre vinutie, tak pre súčin týchto dvoch plôch S_c platí:

$$S_c = S_j \cdot S_v = \frac{(U_1 \cdot t_{ON}) \cdot 2 \cdot I_{1RMS}}{f \cdot \Delta B \cdot J \cdot K} \quad (1)$$

kde U_1 – je primárne napätie, I_{1RMS} – je primárny prúd, f – je frekvencia napätia, ΔB – je zmena magnetickej indukcie, J – je prúdová hustota, K – je koeficient plnenia vinutia a t_{ON} – je čas, ktorý je pre harmonické napätia rovný $T/2$, pričom $T=1/f$.

Vo vysokofrekvenčných transformátoroch sa používa čo najmenšia hodnota zmeny magnetickej indukcie ΔB , aby sa znížili hysterézne straty. Hraničná hodnota maximálnej magnetickej indukcie B_{max} pri frekvenciách do 100 kHz je 0,3 T. Všeobecne platí, čím nižšia hodnota ΔB , tým sú menšie straty [12].

Potom, čo si vypočítame hodnotu súčinu plôch podľa rovnice (1) si katalógových údajov vyberieme vhodné jadro.

Nasledujúcim krokom je výpočet počtu závitov primárneho vinutia pre harmonické napätie s periódou T z nasledujúcej rovnice:

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot T/2}{\Delta B \cdot S_j} \quad (2)$$

Zmena maximálnej magnetickej indukcie je bežná $\pm 0,3$ T (čo znamená $\Delta B = 0,6$ T), ale nemôže byť použitá pre vysokofrekvenčné transformátory. To by spôsobilo neprijateľné straty, t.j. generovanie tepla. Takže pre bežné vysokofrekvenčné transformátory s frekvenciami 20 kHz až 100 kHz zmena indukcie ΔB by mala byť obmedzená na $\Delta B = 0,2$ až 0,3 T.

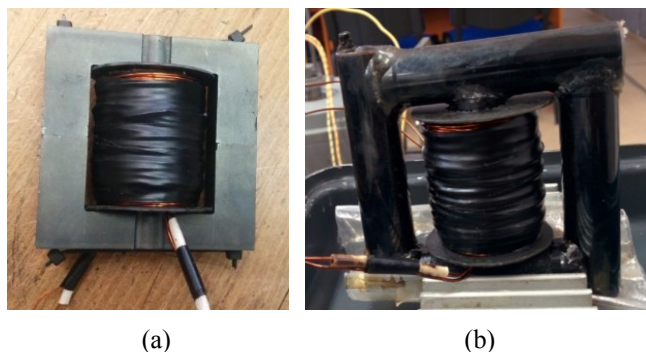
Priemer vodiča závisí od RMS hodnoty prúdu cievky. Ak sú straty zanedbateľné, tak sa počíta efektívna hodnota prúdu z požadovaného výstupného výkonu transformátora P_{out} a vstupného napätia $U_{in,min}$ pre vstupný prúd I_{1eff} a výstupného napätia U_{out} pre výstupný prúd I_{2eff} . Ak je teda magnetizačný prúd zanedbateľný, tak pre zvolenú prúdovú hustotu vo vodiči (volí sa medzi 2 až 5 A/mm² v závislosti od podmienok umiestnenia transformátora v zariadení) sa vypočíta prierez a následne aj priemer vodiča cievky. Pri vysokých frekvenciách a veľkom priemere drôtu je potrebné uvažovať aj nad skin efektom

a preto je pre vinutie potrebné namiesto vodiča s veľkým priemerom použiť napr. 1 mm medenú fóliu [13].

S využitím vyššie popísaných vzťahov a skutočností bol navrhnutý a zrealizovaný vysokofrekvenčný transformátor, ktorý má nasledujúce parametre: počet závitov primárneho vinutia $N_1=100$, počet závitov sekundárneho vinutia $N_2=300$, priemer vodiča primárneho vinutia $d_1=1$ mm, priemer vodiča sekundárneho vinutia $d_2=0,71$ mm a prierezom jadra $S_j=2$ cm².

Tento vysokofrekvenčný transformátor bol navrhnutý a zrealizovaný tak, aby bolo možné meraním overiť a porovnať vlastnosti, pre 2 typy jadier:

1. feritové jadro (Obr. 2a),
2. jadro z magnetickej kvapaliny (Obr. 2b).



Obr. 2. Vysokofrekvenčný transformátor s feritovým jadrom (a) a s jadrom z magnetickej kvapaliny (b)

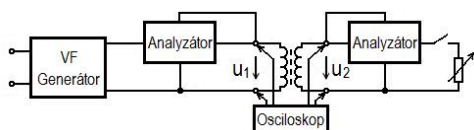
B. Meranie na vysokofrekvenčnom transformátore s feritovým jadrom

Navrhnutý transformátor s feritovým jadrom (Obr. 2a) má namerané parametre, ktoré sú uvedené v Tabuľke 2, pričom impedancia bola meraná pri frekvencii $f=1$ kHz.

TABUĽKA II PARAMETRE TRANSFORMÁTORA S FERITOVÝM JADROM

Parameter	Hodnota
Odpor primárneho vinutia R_1	165,3 mΩ
Odpor sekundárneho vinutia R_2	1,296 Ω
Indukčnosť primárnej strany L_1	27,76 mH
Impedancia primárnej strany Z_1	174,6 Ω
Indukčnosť sekundárnej strany L_2	0,249 H
Impedancia sekundárnej strany Z_2	1,56 kΩ

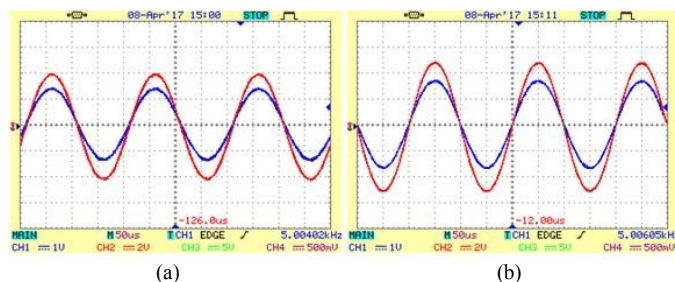
Schéma zapojenia pri meraní je uvedená na Obr. 3. Pre napájanie transformátora bol ako zdroj použitý vysokofrekvenčný generátor, na ktorom sa postupne zvyšovala frekvencia až do 100kHz. Meranie bolo urobené v stave naprázdno a pri odporovom zaťažení. Hodnoty a priebehy vstupného a výstupného napätia boli snímané a zaznamenané na osciloskope.



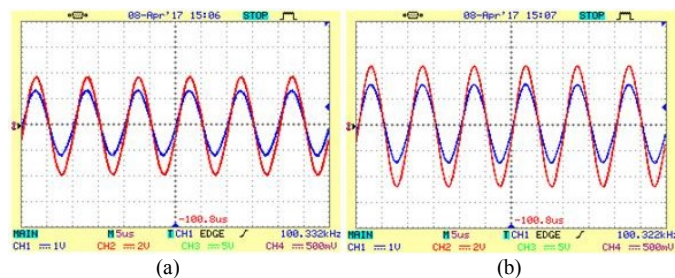
Obr. 3. Schéma zapojenia pri meraní

Hodnoty vstupného a výstupného výkonu, napätia a prúdu boli merané výkonovým analyzátorom.

Vstupné a výstupné napätie pri zaťažení a v stave naprázdno zaznamenané osciloskopom sú pri frekvencii 5 kHz zobrazené na Obrázku 4 a pri frekvencii 100 kHz na Obrázku 5.

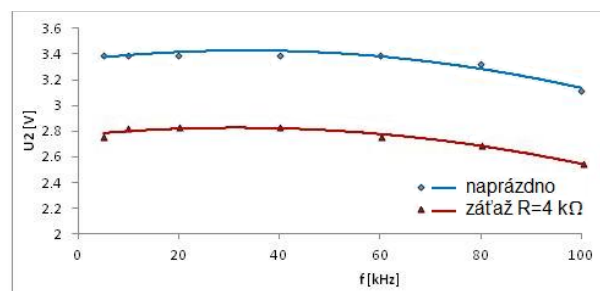


Obr. 4. Vstupné a výstupné napätie na vysokofrekvenčnom transformátore s feritovým jadrom pri zaťažení (a) a naprázdno (b) pri 5 kHz



Obr. 5. Vstupné a výstupné napätie na vysokofrekvenčnom transformátore s feritovým jadrom pri zaťažení (a) a naprázdno (b) pri 100 kHz

Na Obrázku 6 sú zobrazené namerané závislosti výstupného napätia na vysokofrekvenčnom transformátore s feritovým jadrom v stave naprázdno a pri odporovom zaťažení v závislosti od frekvencie vstupného napätia.



Obr. 6. Výstupné napätie na vysokofrekvenčnom transformátore s feritovým jadrom

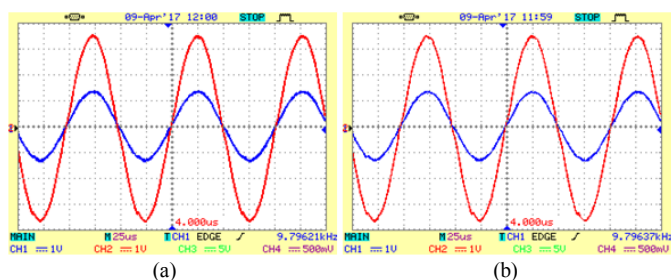
C. Meranie na vysokofrekvenčnom transformátore s jadrom z magnetickej kvapaliny

Po výmene feritového jadra transformátora jadrom z magnetickej kvapaliny (Obr. 2b) toho istého prierezu, má tento transformátor namerané parametre, ktoré sú uvedené v Tabuľke 3, pričom pre porovnanie impedancia bola meraná tiež pri frekvencii $f=1$ kHz.

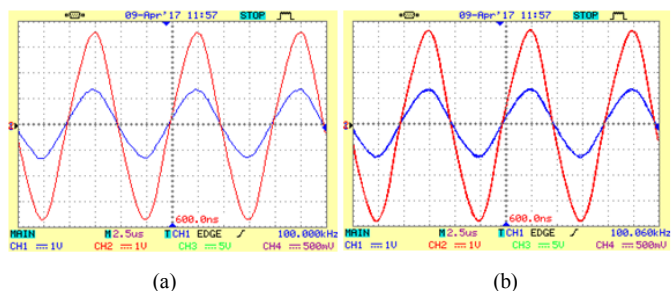
TABUĽKA III PARAMETRE TRANSFORMÁTORA S JADROM Z MAGNETICKEJ KVAPALINY

Parameter	Hodnota
Indukčnosť primárnej strany L_1	0,177 mH
Impedancia primárnej strany Z_1	1,127 Ω
Indukčnosť sekundárnej strany L_2	1,955 mH
Impedancia sekundárnej strany Z_2	12,39 Ω

Schéma zapojenia pri meraní je uvedená na Obr. 3. Vstupné a výstupné napätie pri zaťažení a v stave naprázdno zaznamenané osciloskopom sú pri frekvencii 10 kHz zobrazené na Obrázku 7 a pri frekvencii 100 kHz na Obrázku 8.

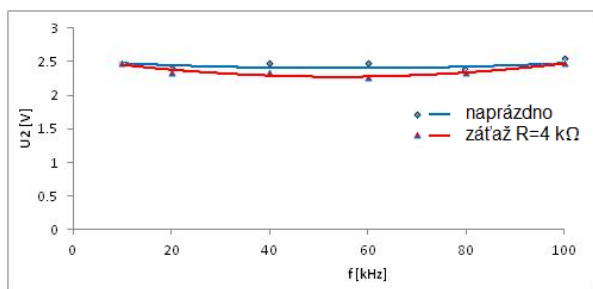


Obr. 7. Vstupné a výstupné napätie na VF transformátore s jadrom z magnetickej kvapaliny pri zaťažení (a) a naprázdno (b) pri 10 kHz



Obr. 8. Vstupné a výstupné napätie na VF transformátore s jadrom z magnetickej kvapaliny pri zaťažení (a) a naprázdno (b) pri 100 kHz

Na Obrázku 9 sú zobrazené namerané závislosti výstupného napätia na vysokofrekvenčnom transformátore s jadrom z magnetickej kvapaliny v stave naprázdno a pri odporovom zaťažení v závislosti od frekvencie vstupného napätia od 10 do 100 kHz.

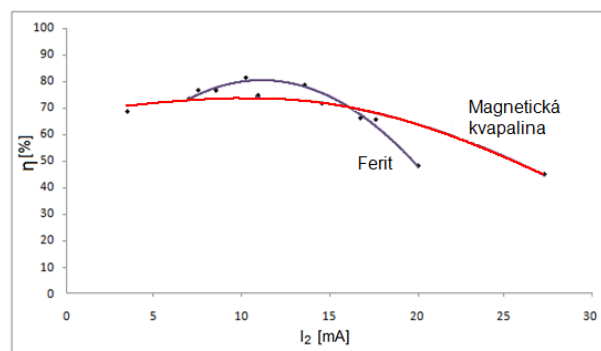


Obr. 9. Výstupné napätie na vysokofrekvenčnom transformátore s jadrom z magnetickej kvapaliny

V. POROVNANIE ÚČINNOSTI TRANSFORMÁTOROV

Na obidvoch transformátoroch boli pomocou výkonových analyzátorov (Obr. 3) merané vstupné a výstupné napätia, prúdy a výkony pre rôzne frekvencie napájacieho napätia pri postupnom zaťažovaní. Pomocou zmeny záťažného odporu pri konštantnom vstupnom napätí ($U_1 = 0,5 \text{ V}$) sa menil záťažný prúd I_2 . Pri zmene záťažného prúdu sa priebeh účinnosti transformátora s feritovým jadrom a aj s jadrom z magnetickej kvapaliny menil tak, ako pri klasickom transformátore s transformátorovými plechmi. Napr. najvyššiu účinnosť transformátora s feritovým jadrom (88%) sme pri frekvencii 10 kHz dosiahli pri záťažnom prúde 16,7 mA. Transformátore s jadrom z magnetickej kvapaliny dosahoval najvyššia účinnosť (pri tej istej frekvencii 10 kHz) pri záťažnom prúde 14,07 mA a účinnosť mala hodnotu 81%.

Na Obrázku 10 je pre názornosť zobrazená účinnosť obidvoch transformátorov v závislosti od záťažného prúdu pri frekvencii 15 kHz.



Obr. 10. Účinnosť transformátorov v závislosti od záťažného prúdu pri frekvencii 15 kHz

Pri frekvencii vstupného napätia 15 kHz sme namerali najvyššiu účinnosť (81%) na feritovom jadre a 75% účinnosť pri jadre z magnetickej kvapaliny. Meraním sa potvrdilo tiež, že zvyšovaním frekvencie napájacieho napätia sa znižuje účinnosť pri použití obidvoch jadier. Aj keď pri feritovom jadre sa dosiahli vyššie účinnosti, tak pri jadre z magnetickej kvapaliny sú síce nižšie, ale sú menej závislé od zmeny záťažovacieho prúdu.

VI. ZÁVER

Hlavným cieľom tohto príspevku bolo overenie vlastností magnetickej kvapaliny pri jej použití ako jadra vo vysokofrekvenčnom transformátore. Pre porovnanie vlastností bol vyrobený vysokofrekvenčný transformátor s feritovým jadrom a tiež s jadrom z magnetickej kvapaliny.

Z nameraných závislostí výstupného napätia na obidvoch vysokofrekvenčných transformátoroch (s feritovým jadrom a s jadrom z magnetickej kvapaliny) v stave naprázdno a pri odporovom zaťažení v závislosti od frekvencie vstupného napätia od 10 do 100 kHz bolo zistené, že pri tom istom zaťažení je úbytok napätia podstatne nižší pri transformátore s jadrom z magnetickej kvapaliny. Pri transformátore s feritovým jadrom je úbytok napätia konštantný v celom meranom rozsahu frekvencie napájacieho napätia (Obr.6) a má priemernú hodnotu 16,76 %. Ale pri transformátore s jadrom z magnetickej kvapaliny sa úbytok napätia mení v závislosti na frekvencii (Obr. 9) a dosahuje maximálnu hodnotu 8,56 %, čo je teda 2x menej ako pri transformátore s feritovým jadrom.

Meraním sa taktiež zistilo, že zvyšovaním frekvencie napájacieho napätia sa znižovala účinnosť pri použití obidvoch jadier. Aj keď pri feritovom jadre sa dosiahli vyššie účinnosti, tak pri jadre z magnetickej kvapaliny sú síce nižšie, ale sú menej závislé od zmeny záťažovacieho prúdu.

Ferohydrodynamika a jej technické aplikácie predstavujú relatívne veľmi mladý vedný odbor, ktorého vývoj ešte zďaleka nedosiahol svoj maximum. Predpokladá sa, že v budúcnosti vzniknú nové stroje, elektrotechnické zariadenia a nové výrobné technológie, ktoré budú využívať magnetickú kvapalinu. Práve preto sa magnetickými kvapalinami v zahraničí zaoberá mnoho popredných priemyselných firiem. O aktuálnosti a perspektívnosti tejto problematiky svedčia fakty, že o feroakvatinách pojednáva veľké množstvo literatúry a výsledky vý-

skumu sú chránené viacej ako troma tisíckami udelených patentov.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-16-0270

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] K. Marton et al., "Exploitation of Magnetic Fluids for Transformer Insulation System", In: *Starnutie elektroizolačných systémov*, č. 7 (2009), s. 7-11, dostupné: <http://web.tuke.sk/fei-kee/jses/>
- [2] D. Mayer, *Magnetické kapaliny a jejich použití (1. část)*, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2007
- [3] D. Mayer, *Magnetické kapaliny a jejich použití (2. část)*, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2007
- [4] Magnetické častice a magnetické kvapaliny, 2015, dostupné: http://www.saske.sk/Uef/intranet/seminare/DOD_081126/zavisova.pdf
- [5] K. Raj, R. Moskowitz, "Commercial applications of ferrofluids", In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 85, 233 (1990)
- [6] Role of ferrofluid in a loudspeaker system, 2015, dostupné: http://www.liquidsresearch.com/en-GB/for_loudspeaker_applications-53.aspx
- [7] Audio ferrofluids, 2015, dostupné: <https://ferrofluid.ferrotec.com/products/ferrofluid/audio/>
- [8] B. Berkovski, V. Bashtovoy, *Magnetic Fluids and Applications Handbook*, Begell House, Wallingford, 1996

- [9] Magnetoreologický tlmič, 2015, dostupné: <http://techbox.dennikn.sk/auto/c5624/tekute-magnety-zdokonalia-auta-aj-roboty.html>
- [10] D. Brousseau et al., "Wavefront correction with a ferrofluid deformable mirror: experimental results and recent developments", 2008, dostupné: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_40/SPIE08.pdf
- [11] Ferrofluid based deformable mirrors, 2015, dostupné: http://www.academia.edu/7598445/Ferrofluid_based_deformable_mirrors_a_new_approach_to_adaptive_optics_using_liquid_mirrors
- [12] Design of inductors and high frequency transformers, 2015, dostupné: http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/snt/snt_eng/snteng6a.pdf
- [13] Transformer design, 2015, dostupné: http://www.tortran.com/transformer_design_guide.html

J. Kaňuch - je absolvent Vysokej školy technickej v Košiciach, Elektrotechnická fakulta, Katedra elektrických pohonov v odbore Silnoprádová elektrotechnika so zameraním na elektrické stroje a prístroje (Ing. 1986). Odvtedy pracuje na danej katedre (v súčasnosti Katedra elektrotechniky a mechatroniky na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej Univerzity v Košiciach) ako odborný asistent. V roku 2006 získal titul PhD. v odbore Silnoprádová elektrotechnika.

Oblasti profesijného a odborného záujmu: Elektrické stroje a prístroje, Grafické CAD systémy, Elektrické pohony, Automobilová elektrotechnika a mechatronika, EMC a Priemyselná elektronika.