

Michal Kosterec, Juraj Kurimský, Roman Cimbala

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

## Analýza tepelného poľa magnetickej kvapaliny a transformátorového oleja

**Abstrakt.** Článok sa zaoberá rozložením tepla v chladiacich médiách, bez použitia umelej cirkulácie chladiacej kvapaliny. Porovnané sú dve chladiace média a to transformátorový olej a magnetická kvapalina. Článok prezentuje tvorbu modelu a simulácie v Ansys Workbench a závere hodnotí výsledky získané zo simulácie.

**Abstract.** This article deals with the distribution of heat in the cooling media, without the use of artificial circulation of the coolant. Two coolants, transformer oil and ferro-fluid, are compared. This paper presents creation of model and simulation in ANSYS Workbench and in the conclusion it evaluates results obtained from the simulation

**Kľúčové slová:** transformátorový olej, magnetická kvapalina, teplota, prúdenie, simulácia.

**Keywords:** transformer oil, ferrofluid, temperature, convection, simulation.

### Úvod

Magnetické kvapaliny sa využívajú v mnohých dôležitých priemyselných aplikáciách ako „tiché“ cievky (zníženie hluku), senzory, tesniace systémy, rôzne typy kontaktov atď. V poslednej dobe sa registruje zvyšujúci sa záujem o ich využitie vo výkonových zariadeniach v elektroenergetike, najmä v transformátoroch, s využitím magnetickej kvapaliny ako dielektrikum a aj ako chladiace médium. Magnetizovateľné nanokvapaliny, ktoré sú použiteľné ako alternatíva namiesto kvapalín na prenos tepla, sa vyznačujú menšou koncentráciou magnetických nanočastíc [1].

Magnetické kvapaliny sa vyznačujú lepším prenosom tepla a dielektrickými vlastnosťami ako transformátorový olej a môžu sa použiť pre zlepšenie tepelného toku, čím zvyšujú schopnosť aktívnych častí odolávať poruchám ako sú napríklad elektromagnetické impulzy. Na umelú cirkuláciu magnetických kvapalín sa môže použiť externé magnetické pole a magnetické sily vo vnútri magnetických kvapalín môžu byť riadené adekvátnym nastavením dopadajúceho magnetického poľa [2][3].

Podrobnejšie detaily, ako napríklad spektrum lokálneho elektrického poľa, prúdenie a prenos tepla a reakcií systému magnetickej kvapaliny na zmenu dopadajúceho magnetického poľa, možno niekedy získať iba použitím numerických simulácií [1][3].

Izolačný systém výkonového transformátora tvorí hlavne minerálny olej papier na báze celulózy na odolanie dielektrickému namáhaniu. Jednou z funkčných požiadaviek minerálneho oleja je nielen byť izolantom, ale aj chladiacim médium. Aj keď súčasný systém sa preukázal ako spoľahlivý a z hľadiska nákladov efektívny, nízka tepelná vodivosť minerálnych olejov používaných ako chladiaca kvapalina v transformátoroch vytvára pochybnosti o schopnosti dobre rozptýliť teplo. Magnetické kvapaliny sa ukázali ako riešenie tohto problému [4].

Rozšírené použitie transformátorového oleja ako izolácia a chladienie vo vysokonapäťových zariadeniach vedie k rozsiahlej výskumnej práci na zvýšenie jeho dielektrických a tepelných vlastností. Príkladom takejto práce je vývoj magnetických kvapalín. Tieto kvapaliny sú vyrobené tak, že do transformátorového oleja sa pridá suspenzia magnetických nanočastíc s cieľom zvýšiť dielektrické a tepelné vlastnosti tohto oleja [5][6].

Jedinečné vlastnosti magnetickej kvapaliny napr. od teploty závislá magnetizácia, flexibilné vlastnosti a jej

stálosť, z nej robia výborné médium do pasívnych chladiacich zariadení. Keď sa permanentný magnet vloží na stranu horúceho objektu, bude priťahovať studenú magnetickú kvapalinu k horúcemu miestu a tým spôsobí, že horúca magnetická kvapalina bude vytlačovaná. To je spôsobené tým, že studená magnetická kvapalina, ktorá má teplotu pod Currieho teplotou, sa vyznačuje silnejšou magnetizáciou než horúca magnetická kvapalina, ktorá má teplotu nad Currieho teplotou (stáva sa paramagneticou). Potom je horúca magnetická kvapalina vytlačovaná smerom k studenej strane nádoby a prenáša teplo, čím vzniká chladienie horúcej strany [7].

### Metódy

Pre analýzu bola použitá metóda magnetickej indukcie. Prvý postup riešenia rovnice magnetickej indukcie je deriváciou Ohmového zákona a Maxwellových rovníc. Rovnica poskytuje vzťah medzi poľom toku tekutiny a magnetickým poľom.

Ohmov zákon, ktorý definuje prúdovú hustotu, je daný:

$$(1) \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}$$

kde:  $\sigma$ - elektrická vodivosť materiálu.

Pre rýchlosť prúdenia tekutiny v magnetickom poli  $\vec{B}$ , Ohmov zákon nadobúda formu:

$$(2) \quad \vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B})$$

Z Ohmového zákona a Maxwellovej rovnice môžeme rovnicu indukcie derivovať ako:

$$(3) \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{U} * \nabla) \vec{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} * \nabla) \vec{U}$$

Z vyriešeného magnetického poľa  $\vec{B}$  môže byť vypočítaná prúdová hustota  $\vec{j}$  použitím Ampérového vzťahu ako:

$$(4) \quad \vec{j} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B}$$

Magnetické pole  $\vec{B}$  v magnetohydrodynamickej problematike môže byť rozložené ako predpísané externé pole  $\vec{B}_0$  a indukované pole  $\vec{b}$  v dôsledku pohybu kvapaliny. Iba indukované pole  $\vec{b}$  musí byť vyriešené.

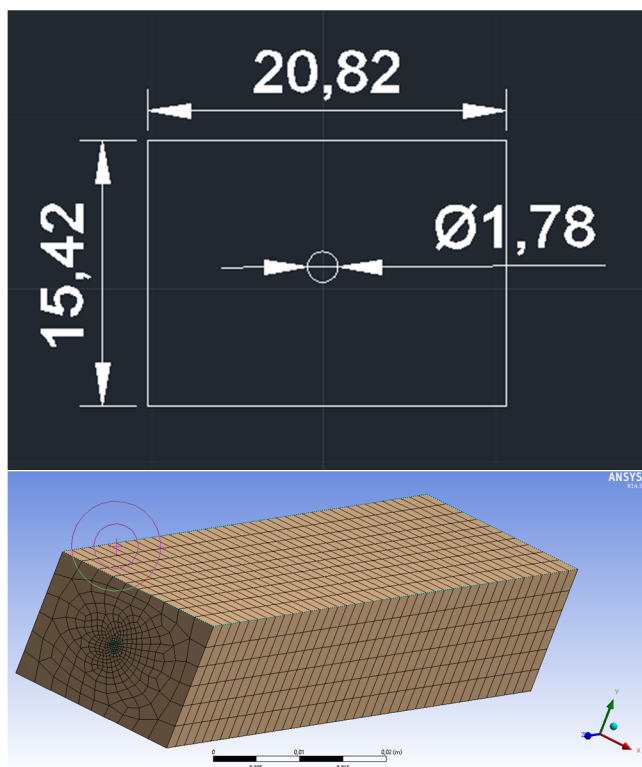
Predpísané pole  $\vec{B}_0$  z Maxwellových rovníc spĺňa nasledujúcu rovnicu:

$$(5) \quad \nabla^2 \vec{B}_0 - \mu \sigma' \frac{\partial \vec{B}_0}{\partial t} = 0$$

Kde:  $\sigma'$  - elektrická vodivosť,  $\vec{B}_0$  - magnetické pole.

**Model**

3D model bol realizovaný v CAD programe a následne načítaný do simulačného programu Ansys Workbench pre ďalšiu analýzu. Model tvoril vodič s prierezom  $2,5 \text{ mm}^2$  o dĺžke 100mm uložený v nádobe s kvapalinou s rozmermi  $20,82 \times 15,42 \times 100 \text{ mm}$  (Obr.1.). Vodič bol definovaný ako zdroj tepla o veľkosti  $1,255 \times 10^7 \text{ W/m}^3$  (čo zodpovedá teplu generovaného vo vodiči prechodom prúdu o veľkosti 16A) a ako zdroj magnetického poľa o veľkosti 0,5T s frekvenciou 50 Hz. Okrajové steny kvapaliny mali zadefinovaný tok tepla o veľkosti  $100 \text{ W/m}^2$  do okolia s teplotou  $20^\circ\text{C}$ . Pribeh analýzy trval od 0 do 300 sekúnd.



Obr.1. Geometria modelu

Na modeli bolo vykonaných 6 analýz:

1. analýza: uloženie vodiča kolmo na pôsobiacie gravitačné pole s olejom ako chladiace médium,
2. analýza: uloženie vodiča kolmo na pôsobiacie gravitačné pole s magnetickou kvapalinou ako chladiace médium,
3. analýza: uloženie vodiča súbežne s pôsobiacim gravitačným poľom s olejom ako chladiace médium,
4. analýza: uloženie vodiča súbežne s pôsobiacim gravitačným poľom s magnetickou kvapalinou ako chladiacou kvapalinou.

V experimentoch boli použité materiály s nasledujúcimi parametrami:

Tabuľka 1. Parametre medeného vodiča

Hustota $\rho$	8978 kg/m <sup>3</sup>
Teplná kapacita $C_p$	381 J/(kg*K)
Teplná vodivosť $K_c$	387,6 W/(m*K)
Elektrická vodivosť	$5,8 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$
Magnetická permeabilita	$1,257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$

Tabuľka 2. Parametre transformátorového oleja

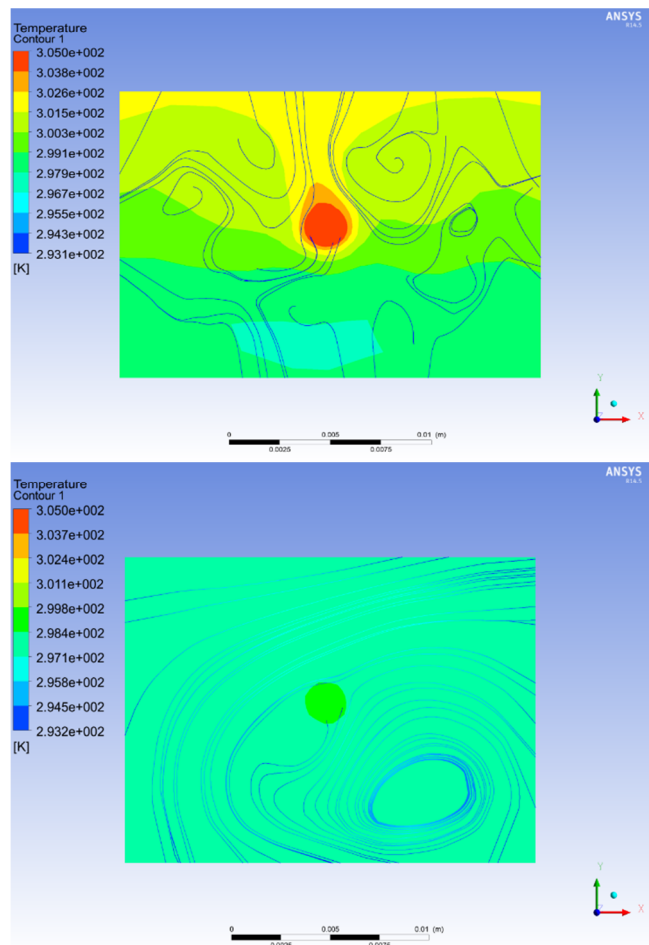
Hustota $\rho$	880 kg/m <sup>3</sup>
Teplná kapacita $C_p$	1860 J/(kg*K)
Teplná vodivosť $K_c$	0,162 W/(m*K)
Viskozita	0,01936 kg/(m*s)
Koeficient tepelnej rozťažnosti	$7,5 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$
Referenčná teplota	20°C
Magnetická permeabilita	$1,8472 \times 10^{-6}$

Tabuľka 3. Parametre nanočastíc

Hustota	5100 kg/m <sup>3</sup>
Teplná kapacita	670 J/(kg*K)
Magnetická permeabilita	$1,8723 \times 10^{-6}$
Množstvo	0,05%

**Výsledky a diskusia**

Zo zoznamu analýz sú prezentované výsledky z 1. a 2. analýzy. Na obrázku 2 je zobrazené teplotné pole a prúdnicie kvapaliny v čase 300 sekúnd.



Obr.2. Teplotné pole oleja (hore) a magnetickej kvapaliny (dole) v čase 300 sekúnd

Teplota vodiča dosahovala maximálnu hodnotu 35°C pri použití oleja ako chladiace médium. Teplota oleja mala maximálnu hodnotu 32°C. Ako naznačujú prúdnice, ohrievaním oleja nastala prirodzená cirkulácia. Pri použití magnetickej kvapaliny ako chladiace médium dosahovala teplota vodiča po celej dĺžke 28°C a teplota magnetickej kvapaliny bola v celom objeme 26°C. V kvapaline prevláda pohyb nanočastíc posôbením magnetickeho poľa nad prirodzenou cirkuláciou, čím sa dosahuje umelá cirkulácia bez použitia čerpadiel a efektívnejšie chladenie vodiča. Je to spôsobené tým, že chladnejšia magnetická kvapalina má väčšiu magneticú susceptibilitu a je priťahovaná ku zdroju magnetickeho poľa počas termomagnetickej konvekcie, kde vytláča teplejšiu magneticú kvapalinu s nižšou magneticou susceptibilitou. Prenos tepla pri tejto konvencii je oveľa účinnejší ako prenos tepla pri prirodzenej cirkulácii.

### Záver

Z výsledkov tejto simulácie je možné určiť, že magnetická kvapalina je lepšie chladiace médium ako transformátorový olej. Zo simulácie sa zistilo, že smer pôsobenia gravitačného poľa nemá vplyv na rozloženie teploty magnetickej kvapaliny. Magnetická kvapalina rovnomerne rozloží teplotu v celom objeme na rozdiel od oleja. Pri použití magnetickej kvapaliny s tým istým objemom ako má olej vodič aj kvapalina dosahuje menšiu teplotu. Z toho vyplýva, že sa môže použiť menšia nádoba s magneticou kvapalinou na dosiahnutie rovnakých chladiacich účinkov, ako pri chladení olejom.

### Pod'akovanie

Práca bola podporená Slovenskou Akadémiou Vied a Ministerstvom Školstva v rámci projektov VEGA č. 1/0311/15, a 2/0141/16.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0438.

### Literatúra

- [1] A. M. Morega, M. Morega, L. Pâslaru-Dănescu, V. L. Stoica, F. Nouras, F. D. Stoian: A Novel, Ferrofluid-Cooled Transformer. Electromagnetic Field and Heat Transfer by Numerical Simulation, OPTIM 2010, 12th Int. Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 22-24 May 2010, DOI 10.1109/OPTIM.2010.5510528, ISBN 978-1-4244-7019-8, pp. 401-406, Brasov, Romania.
- [2] C. Tangthieng, B.A. Finlayson, J.S. Maulbetsch, T. Cader: Heat transfer enhancement in ferrofluids subjected to steady magnetic field. Timisoara, 8th International Conference on Magnetic Fluids (ICMF), Timisoara, Romania, June 29-July 3, 1998, JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, pp 252-255, ISBN 0304-8853
- [3] S.M. Snyder, T. Cader, B.A. Finlayson: Finite element model of magnetoconvection of a ferrofluid, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 262, 2003, pp.269-279.
- [4] S. Chaudhari, S. Patil, R. Zambare, S. Chakraborty: Exploration on Use of Ferrofluid in Power Transformers, IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Bangalore, India: 24-28 July 2012
- [5] V. Segal, K. Raj: An investigation of power transformer cooling with magnetic fluid. Indian J. Material Sci. Vol 5., December 1998
- [6] G.J. Hwang, M. Zahn, F.M. O'sullivan: Electron Scavenging by conductive nanoparticles in oil insulated power transformers. Cambridge, Electrostatics joint conference- paper 1.1: 2009
- [7] Z. Fang, R. O'handley, Y. Liu, M. Yang: FEA simulation of passive ferrofluid cooling systems. Boston, Comsol Conference: 2010

### Autori:

*Michal Kosterec, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: michal.kosterec@tuke.sk*

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

*Roman Cimbala,, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: roman.cimbala@tuke.sk*