

Michal Rajňák, Katarína Paulovičová, Marek Franko, Juraj Kurimský, Roman Cimbala, Milan Timko, Peter Kopčanský

## Magnetické kvapaliny v elektrických transformátoroch

Neustály nárast spotreby elektrickej energie kladie čoraz väčšie nároky na výkonnosť a spoľahlivosť elektrických strojov v distribučnej sústave. Spoľahlivosť a výkonnosť elektrických transformátorov závisí aj od chladiacich a elektro-izolačných médií, akými sú transformátorové oleje. V tejto práci bol nano-funkcionalizovaný súčasný transformátorový olej magnetickými nanočasticami a fullerénom. Cieľom práce je zvýšiť chladiacu účinnosť transformátorového oleja. Otepľovacie skúšky boli vykonané na jednofázovom transformátore s nominálnym výkonom 5 kVA. Zistilo sa, že prítomnosť magnetických nanočastíc v oleji (0,01%w/V) má za následok zníženie pracovnej teploty transformátora o 5 K. Nanofunkcionalizácia oleja fullerénom (0,01%w/V) vedie k zníženiu oteplenia až o 8 K.

KLúčové slová: transformátorový olej, nanofunkcionalizácia, nanočastice, tepelné vlastnosti, magnetické kvapaliny

The constant increase in the electricity consumption put greater demands on the performance and reliability of electrical equipment in the distribution system. The reliability and performance of electrical transformers depend on cooling and electro-insulating media such as transformer oils. In this work, current transformer oil is nano-functionalized with magnetic nanoparticles and fullerene. The aim of the work is to increase the cooling efficiency of the transformer oil. Temperature rise tests were performed on a single-phase transformer with a nominal power of 5 kVA. It was found that the presence of magnetic nanoparticles in the oil (0.01%w/V) results in a reduction of the working temperature of the transformer by 5 K. Nanofunctionalization of the oil with fullerene (0.01%w/V) leads to a reduction in temperature rise by up to 8 K. (**Magnetic fluids in liquid-immersed transformers**)

Keywords: transformer oil, nanofunctionalization, nanoparticles, thermal properties, magnetic fluids

### I. ÚVOD

Minerálne transformátorové oleje sa už dlhodobo úspešne používajú vo výkonových transformátoroch ako chladiace a elektro-izolačné médiá. Celosvetový nárast spotreby elektrickej energie a environmentálne aspekty však prinášajú nové požiadavky na kvapaliny v transformátoroch, týkajúce sa najmä vplyvov na životné prostredie a vyššej účinnosti chladenia. Takéto požiadavky možno splniť pomocou nanotechnológií, predovšetkým nanokvapalinami na báze biologicky odbúrateľných olejov. Spomedzi veľkého množstva nanokvapalín je pre transformátorové aplikácie zvlášť atraktívna magnetická kvapalina. Ide o stabilnú koloidnú suspenziu superparamagnetických nanočastíc v transformátorovom oleji [1,2]. Jedinečnosť takej kvapaliny spočíva v kombinácii tekutosti a magnetizmu, čo umožňuje ovládanie toku, štruktúry a iných fyzikálnych vlastností magnetickej kvapaliny pomocou magnetického poľa. Okrem tradičných magnetických kvapalín sa v súčasnosti vo výskume stretávame aj s hybridnými magnetickými kvapalinami. Tie sa vyznačujú obsahom dvojakých nanočastíc, a to magnetických a nemagnetických, pričom úlohou nemagnetických nanočastíc je ďalšie ladenie požadovaných fyzikálnych vlastností nosnej kvapaliny. Medzi nemagnetické nanočastice pre hybridné magnetické kvapaliny je možné zaradiť uhlíkové nanočastice, akými sú grafén, uhlíkové nanorúrky a fullerén. V súčasnosti sú nanočastice fullerénu C<sub>60</sub> atraktívnymi nanoplňivami na zlepšenie elektro-izolačných kvapalín, najmä vďaka ich pozitívnemu vplyvu na oxidačnú stabilitu izolačných olejov [3]. Vďaka silnej elektronegativite a schopnosti absorpcie fotónov môže C<sub>60</sub> zlepšiť elektro-izolačné vlastnosti transformátorových olejov [4]. Bolo dokázané, že nanočastice C<sub>60</sub> môžu súčasne zvýšiť impulzné preskokové napätie a preskokové napätie sieťovej frekvencie izolačného oleja až o 18 % [5]. Výhodné

elektroizolačné a tepelné vlastnosti oxidu železa a nanokvapalín na báze C<sub>60</sub> nás motivovali k aplikácii týchto nanočastíc v súčasnom biodegradovateľnom transformátorovom oleji. Následne boli nanofunkcionalizované oleje charakterizované a aplikované v jednofázovom výkonovom transformátore s nominálnym výkonom 5 kVA.

### II. MATERIÁL A METÓDY

Základným materiálom, na báze ktorého boli pripravené skumané magnetické kvapaliny je transformátorový olej Shell Diala S4, ktorý je vyrobený metódou GTL, teda zo skvapalneného zemného plynu. Jeho body vzplanutia a tuhnutia sú 464 K a 233 K. V tomto oleji boli homogénne rozptýlené feritové nanočastice (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), ktoré mali priemernú veľkosť 13 nm. Magnetické nanočastice boli pripravené metódou chemickej ko-precipitácie [6,7]. Na prípravu hybridnej nanokvapaliny boli použité komerčné nanočastice fullerénu C<sub>60</sub> [7] od firmy Merck s 99,5% čistotou. Koncentrácia fullerénu v nanofunkcionalizovanom oleji je 0,01%w/V. Magnetické nanočastice boli rozptýlené o rovnakej koncentrácii. Meranie viskozity reometrom MCR 502 Physica Anton Paar GmbH odhalilo zanedbateľný vplyv tak malej koncentrácie nanočastíc na viskozitu funkcionalizovaného oleja. Namerané hodnoty viskozity nanokvapalín a oleja (13 mPa·s pri teplote 298 K) sa líšili na úrovni chyby merania.

Pripravené nanokvapaliny boli aplikované vo výkonovom transformátore na pracovisku EVPÚ, as. Označenie transformátora je T1N-5-400/230, čo poukazuje na jednofázový transformátor s nominálnym výkonom 5 kVA, transformujúci 400 V na 230 V. Z nádob transformátora vedú chladiace rúrky, pričom celý objem nádoby je 12 litrov. V transformátore boli osadené teplotné snímače na jednotlivých miestach transformátora (primárne a sekundárne vinutie, jadro, vrchný kryt, plášť hore a dole) a na chladiacej rúrke bol

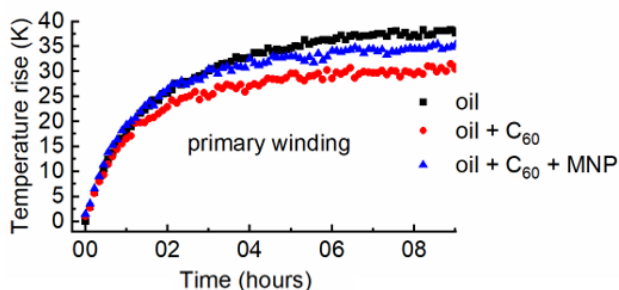
umiestnený prietokomer. Transformátor bol naplnený najprv čistým transformátorovým olejom a na transformátore bola vykonaná otepľovacia skúška pri zaťažení transformátora odporovou záťažou (obrázok 1). Po vykonaní otepľovacej skúšky s transformátorovým olejom bol transformátor vyprázdnený, prepláchnutý olejom a naplnený nanokvapalinou, s ktorou bol vystavený rovnakej otepľovacej skúške.



Obr. 1. Testovaný jednofázový transformátor s odporovou záťažou. Na chladiacich rúrkach transformátora je osadený prietokomer.

### III. VÝSLEDKY

Každá otepľovacia skúška transformátora s transformátorovým olejom a nanokvapalinami prebiehala minimálne 8 hodín. Počas tejto skúšky boli po zaťažení transformátora monitorované teploty na jednotlivých miestach transformátora. Následne sa vypočítalo oteplenie ako rozdiel teplôt transformátora a okolia. Príklad priebehu oteplenia je zobrazený na obrázku 2, ktorý predstavuje oteplenie primárneho vinutia pre tri prípady chladiacej kvapaliny, a to olej, olej s fullerénom  $C_{60}$  a olej s fullerénom  $C_{60}$  a magnetickými nanočasticami (MNP). Podobné priebehy oteplenia boli získané na rôznych miestach transformátora s rôznymi maximálnymi hodnotami oteplenia. Priemerné hodnoty oteplenia v ustálenom stave (maximálne oteplenia) pre transformátor naplnený olejom, olejom s fullerénom a olejom s fullerénom a magnetickými nanočasticami sú nasledovné. Na primárnom vinutí 37,8 K, 30,1 K, 35,1 K. Na sekundárnom vinutí 42,3 K, 34,3 K, 36,7 K. Ja jadre transformátora 38,9 K, 30,9 K, 35,3 K. Na vrchnom kryte transformátora 36,1 K, 28,8 K, 32,9 K. Oteplenie na plášti hore bolo 31,9 K, 24,5 K, 28,5 K a na plášti dole 25,1 K, 18,1 K, 22 K. Na preukázanie rozdielu oteplenia transformátora naplneného nanokvapalinami s transformátorom chladeným čistým transformátorovým olejom je možné odpočítať hodnoty oteplenia transformátora s nanokvapalinou od hodnôt



Obr. 2. Časový priebeh oteplenia na primárnom vinutí testovaného jednofázového transformátora s odporovou záťažou pri naplnení olejom (oil), olejom s fullerénom (oil+C<sub>60</sub>) a olejom s fullerénom a magnetickými nanočasticami (oil+C<sub>60</sub>+MNP).

oteplenia transformátora s olejom. Výsledkom takého porovnania je zistenie, že priemerné oteplenie transformátora chladeného s olejom a fullerénom je o 7,6 K menšie oproti otepleniu transformátora

s čistým olejom. Na druhej strane, priemerné oteplenie transformátora naplneného olejom s fullerénom a magnetickými nanočasticami tiež vykazuje pokles oproti otepleniu s čistým olejom, ale len o 3,6 K. Experimentálne bolo tiež zistené, že nanokvapalina s fullerénom prúdi v chladiacich rúrkach transformátora s väčším prietokom (7 ml/min) ako nanokvapalina s fullerénom a magnetickými nanočasticami (4 ml/min).

### IV. DISKUSIA

Z výsledkov otepľovacích skúšok je zrejme, že obidve nanokvapaliny poskytujú výrazne lepšie chladenie transformátora ako samotný transformátorový olej. Porovnanie dostupných fyzikálnych vlastností oboch nanokvapalín môže byť kľúčom k vysvetleniu rôznej úrovne oteplenia transformátora. Experimentálne bolo zistené, že porovnávané nanokvapaliny vykazujú nemerateľné rozdiely v ich viskozite. To isté platí aj pre ich hustoty. Z tohto pohľadu sú v transformátore rovnaké podmienky na rozvinutie prirodzenej konvekcie. Existujú však dva pozoruhodné rozdiely, ktoré môžu vysvetľovať rôznu mieru chladenia obidvozna nanokvapalinami. Prvý súvisí s veľkosťou nanočastíc. Je možné predpokladať, že väčšie klastre nanočastíc, ktoré sú prítomné v oleji s fullerénom vytvárajú vodivé cesty pre efektívnejší odvod tepla. Na druhej strane, magnetické nanočastice v transformátorovom oleji neprestávajú prudké rozhranie tepelných vlastností kvôli prítomnej vrstve kyseliny olejov. Tepelná vodivosť tejto vrstvy je blízka vodivosti oleja, takže rozhranie magnetických nanočastíc nezabezpečuje výrazný tepelný kontrast. Naopak, v hybridnej nanokvapaline môžu magnetické nanočastice narušovať fullerénové vodivé cesty, čo považujeme za jednu z príčin menšej chladiacej účinnosti tejto nanokvapaliny. Okrem toho, hybridná nanokvapalina má o tri rády väčšie dielektrické straty ako v prípade nanokvapaliny s fullerénom. Väčšie dielektrické straty môžu byť zdrojom doplnkového nežiadúceho tepla.

### V. ZHRNUTIE A ZÁVER

Tento príspevok reportuje výsledky otepľovacích skúšok modelového transformátora s dvoma rôznymi nanokvapalinami a čistým transformátorovým olejom. Otepľovacie skúšky boli vykonané na jednofázovom transformátore s nominálnym výkonom 5 kVA. Zistilo sa, že prítomnosť magnetických nanočastíc v oleji (0,01%w/V) má za následok zníženie pracovnej teploty transformátora o 5 K. Nanofunkcionalizácia oleja fullerénom (0,01%w/V) vedie k zníženiu oteplenia až o 8 K. Podľa získaných výsledkov je možné konštatovať, že použitie skúmaných nanokvapalín v transformátoroch môže mať pozitívne ekonomické dôsledky. Tie spočívajú najmä v možnosti výroby menších transformátorov (menej materiálu kvôli efektívnejšiemu chladeniu nanokvapalinou) a v predĺžení životnosti transformátorov. Je známe, že zníženie pracovnej teploty transformátora o 8°C spôsobí predĺženie jeho životnosti o polovicu. Pri bežnej životnosti 40 rokov je toto predĺženie významné. Na druhej strane, pri nastupujúcej elektromobilitate a očakávaných vysokých a kolísavých zaťaženiach transformátora poskytne nanokvapalina spoľahlivejšiu prevádzku transformátora.

**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] M. Kole and S. Khandekar, "Engineering applications of ferrofluids: A review," *J. Magn. Magn. Mater.* 537, 168222 (2021).
- [2] I. Nkurikiyimfura, Y. Wang, and Z. Pan, "Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids—A review," *Renewable Sustainable Energy Rev.* 21, 548, (2013).
- [3] D. Szczesniak and P. Przybylek, "Oxidation stability of natural ester modified by means of fullerene nanoparticles," *Energies* 14, 490 (2021).
- [4] P. Sun, W. Sima, J. Chen, D. Zhang, X. Jiang, and Q. Chen, "An application area of C60: Overall improvement of insulating oil's electrical performance," *Appl. Phys. Lett.* 112, 142902 (2018).
- [5] J. Chen, P. Sun, W. Sima, Q. Shao, L. Ye, and C. Li, "A promising nano-insulating-oil for industrial application: Electrical properties and modification mechanism," *Nanomater* 9, 788 (2019).
- [6] M. Rajnak, M. Franko, K. Paulovicova, M. Karpets, K. Parekh, R. Upadhyay, et al. "Effect of ferrofluid magnetization on transformer temperature rise" *J. Phys. D: Appl. Phys.* 55 (2022) 345002
- [7] M. Rajnak, J. Kurimsky, K. Paulovicova, M. Franko, B. Dolnik, R. Cimbala, et al. "Dielectric and thermal performance of a C<sub>60</sub>-based nanofluid and a C<sub>60</sub>-loaded ferrofluid, *Phys. Fluids* 34, 107106 (2022)

**ADRESY AUTOROV**

Michal Rajňák, 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)  
Marek Franko, EVPÚ, a. s., Trenčianska 19, 01851 Nová Dubnica, Slovenská Republika, [franko@evpu.sk](mailto:franko@evpu.sk)  
Juraj Kurimský, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [juraj.kurimsky@tuke.sk](mailto:juraj.kurimsky@tuke.sk)  
Roman Cimbala, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [Roman.Cimbala@tuke.sk](mailto:Roman.Cimbala@tuke.sk)  
Milan Timko, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, Košice, 04001, Slovenská Republika, [timko@saske.sk](mailto:timko@saske.sk)  
Peter Kopčanský, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, Košice, 04001, Slovenská Republika, [kopcan@saske.sk](mailto:kopcan@saske.sk)