



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-18-0160

Nanokvapaliny v elektrotechnike

Zodpovedný riešiteľ **RNDr. Michal Rajňák, PhD.**

Príjemca **Ústav experimentálnej fyziky SAV, v. v. i.**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Ústav experimentálnej fyziky SAV, v.v.i., Košice
Fakulta elektrotechniky a informatiky TU v Košiciach
Elektrotechnický výskumný a projektový ústav, Nová Dubnica

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

P. D. Patel Institute of Applied Sciences, Charotar University of Science and Technology, Anand, India
Adam Mickiewicz University, Poznan, Poland
BCMaterials. Basque Centre for Materials, Applications and Nanostructures, Leioa, Spain
IKERBASQUE, Basque Foundation for Science, Bilbao, Spain
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
Institut Laue-Langevin, Grenoble, France
Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland
Biologické centrum AV ČR, v.v.i., České Budějovice, Czech Republic

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

Patentová prihláška č. PP 50062-2021 v Slovenskej republike s názvom: Zariadenie na meranie magneto-dielektrických vlastností tenkých dielektrických vrstiev a systém obsahujúci toto zariadenie.
Medzinárodná PCT prihláška, zapísaná pod číslom PCT/SK2022/050009 (Device for measuring the magneto-dielectric properties of thin dielectric layers and a system containing the device).
V registri ÚPV SR zapísaný úžitkový vzor č. 9651 s názvom Prípravok na meranie tepelnej vodivosti kvapalín pri rôznych teplotách.
V registri dizajnov ÚPV SR zapísaný dizajn č. 28964 s názvom Prípravok na meranie tepelnej vodivosti kvapalín pri rôznych teplotách.

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

1. M. Rajnak et al., Statistical analysis of AC dielectric breakdown in transformer oil-based magnetic nanofluids, Journal of Molecular Liquids 309 (2020) 113243, doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113243
2. M. Rajnak et al., Controllability of ferrofluids' dielectric spectrum by means of external electric forces, Journal of Physics D: Applied Physics, 54 (2021) 035303 (11pp),

<https://doi.org/10.1088/1361-6463/abbeb6>

3. M. Rajnak et al., Dynamic magnetic response of ferrofluids under a static electric field, *Physics of Fluids*, 33, 082006 (2021); doi: 10.1063/5.0059285
4. J. Kurimsky et al., Electrical and acoustic investigation of partial discharges in two types of nanofluids, *Journal of Molecular Liquids*, 341(2021),117444, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117444>
5. M. Šárpataky et al., Dielectric Fluids for Power Transformers with Special Emphasis on Biodegradable Nanofluids, *Nanomaterials* 2021, 11, 2885. <https://doi.org/10.3390/nano11112885>
6. M. Rajňák et al., Dielectric and thermal performance of a C60-based nanofluid and a C60-loaded ferrofluid, *Phys. Fluids*. 34 (2022) 107106. <https://doi.org/10.1063/5.0117899>.
7. M. Rajňák et al., Effect of ferrofluid magnetization on transformer temperature rise, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 55 (2022) 345002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/AC7425>.
8. M. Karpets et al., Electric field-induced assembly of magnetic nanoparticles from dielectric ferrofluids on planar interface, *J. Mol. Liq.* 362 (2022) 119773. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2022.119773>.
9. M. Šárpataky et al., Synthetic and natural ester-based nanofluids with fullerene and magnetite nanoparticles – An experimental AC breakdown voltage study, *J. Mol. Liq.* 368 (2022) 120802. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2022.120802>.
10. R. Cimbala et al., Dielectric response of a hybrid nanofluid containing fullerene C60 and iron oxide nanoparticles, *J. Mol. Liq.* 359 (2022) 119338. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2022.119338>.
11. M. Rajňák et al., Dielectric spectrum of a ferrofluid layer exposed to a gradient magnetic field, *J. Chem. Phys.* 158 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0151811/2892516>.
12. P. Havran et al., Dielectric relaxation response of electrical insulating liquids under different natures of thermal stress, *J. Mater. Res. Technol.* 25 (2023) 1599–1611. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.06.033>.

Kapitoly v knihe:

M. Timko, P. Kopcansky, M. Rajnak, M. Karpets, K. Paulovicova, O. V. Kovalchuk and L. A. Bulavin, Dielectric and Magnetic Properties of Nanofluids, in *Fundamentals and Transport Properties of Nanofluids*, edited by S. M. Sohel Murshed, Royal Society of Chemistry, ISBN 978-1-83916-419-4, 21 Dec. 2022, <https://doi.org/10.1039/9781839166457>

P. Kopcansky, L. Balejckova, M. Molcan, O. Strbak, I. Safarik, E. Baldikova, J. Prochazkova, R. Angelova, K.Z. Pospiskova, M. Rajnak, K. Paulovicova, M. Karpets, M. Timko, N. Tomasovicova, K. Zakutanska, V. Lackova, P. Bury, *Magnetic Nanoparticles Change the Properties of Traditional Materials and Open up New Application Possibilities*, *Mater. Asp. Ferrofluids*. (2023), 214–249, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003274247-11>.

Uplatnenie výsledkov projektu

Dosiahnuté výsledky môžu nájsť využitie v elektroenergetickom priemysle v oblasti chladenia a elektrickej izolácie elektrických strojov pomocou nanokvapalín. V súčasnosti na Slovensku bol o dosiahnuté výsledky prejavovaný záujem firmou BEZ Transformátory, a.s., ktorá je výrobcom distribučných transformátorov. Na základe spoločných diskusií o dosiahnutých výsledkoch bola dohodnutá užšia spolupráca medzi riešiteľskými organizáciami projektu a firmou BEZ Transformátory a.s. Okrem toho, táto firma za zmluvne zaviazala byť odberateľom výsledkov výskumu v rámci vyvolaného projektu APVV-22-0115. Dosiahnuté výsledky ukončeného projektu budú využité pri aplikácií nanokvapalín v skúšobniach BEZ Transformátory a.s.

Výsledkami projektu sú aj vyvinuté zariadenia na meranie dielektrickej odozvy, či tepelnej vodivosti nanokvapalín, vid'. patentová prihláška, úžitkový vzor a dizajn. Tieto výsledky môžu nájsť uplatnenie vo viacerých stupňoch výskumu chladiacich a dielektrických kvapalín, či v oblasti priemyselnej diagnostiky technických kvapalín.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Riešením tohto projektu boli pripravené a charakterizované viaceré nanokvapaliny na báze minerálnych transformátorových olejov, olejov zo skvapalneného zemného plynu a na báze prírodného a syntetického esteru. Ukázalo sa, že dlhodobú stabilitu nanokvapalín s

obsahom magnetických a uhlíkových nanočastíc je možné dosiahnuť v minerálnych olejoch a v skvapalnenom zemnom plyne pomocou konvenčného surfaktanu. Štúdiom dielektrickej odzvy magnetických kvapalín bolo zistené, že dielektrické spektrá je možné citlivo ovplyvňovať externým magnetickým a elektrickým poľom, čo môže nájsť uplatnenie v oblasti senzoriky alebo spínania. Bolo dokázane, že externým elektrickým poľom je možné ovládať aj spektrum magnetickej susceptibility magnetických kvapalín. Tento jav môže byť využitý na detekciu tvorby zhlukov nanočastíc v elektrickom poli.

Zistilo sa, že elektrické preskokové napätie olejov sa nepodarilo vylepšiť pridaním všetkých typov nanočastíc. Analýzou výsledkov sa dospelo k záveru, že príčinou nevylepšeného preskokového napätia oleja je neefektívne vychytávanie priestorového náboja na povrchu nanočastíc kvôli vrstve surfaktantu a kvôli slabému dielektrickému kontrastu. Na druhej strane, prítomnosť stabilizovaných nanočastíc oxidov železa dokáže výrazne potláčať čiastočné výboje v minerálnom oleji, nie však v skvapalnenom zemnom plyne.

Neutrónovými a röntgenovými metódami bola dokázaná štrukturalizácia nanočastíc v oleji pod vplyvom externého magnetického a elektrického poľa. Poznanie štrukturalizácie nanočastíc v nanokvapalinách na rozhraní s tuhým telesom prispieva k pochopeniu tepelného transportu z tuhého telesa do nanokvapaliny. Štruktúrne efekty v nanokvapaline na rozhraní s elektrickým vodičom s priloženým potenciálom môžu pomôcť pochopiť mechanizmus iniciácie elektrického preskoku v nanokvapalinách.

V rámci tohto projektu bol vyrobený jednofázový transformátor s nominálnym výkonom 5 kVA. V tomto transformátore boli aplikované pripravené nanokvapaliny vo funkcii chladiaceho a izolačného média. Otepľovacie skúšky transformátora odhalili, že vďaka magnetickým kvapalinám je možné dosiahnuť menšie oteplenie transformátora. Toto platí ale len pre nízku magnetizáciu nasýtenia kvapaliny, pretože pri vyšších hodnotách dochádza k silným interakciám magnetickej kvapaliny s magnetickým poľom transformátora, čo má za následok blokáciu prúdenia kvapaliny a zhoršené chladenie. Výrazný pokles oteplenia transformátora až o 8°C bol dosiahnutý aplikáciou nanokvapaliny na báze skvapalneného zemného plynu a nanočastíc fullerénu C60. Nanokvapaliny s týmto typom nanočastíc vykazujú aj menšie dielektrické straty ako samotný olej.

Získanými výsledkami boli splnené všetky stanovené ciele projektu.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

Several nanofluids based on mineral transformer oils, oils from liquefied natural gas, and natural and synthetic esters were prepared and characterized as a result of this project. It has been shown that the long-term stability of nanofluids containing magnetic and carbon nanoparticles can be achieved in mineral oils and in liquefied natural gas using a conventional surfactant. By studying the dielectric response of magnetic fluids, it was found that the dielectric spectrum can be sensitively influenced by an external magnetic and electric field, which can be utilized in the field of sensors or switching. It has been proven that the spectrum of magnetic susceptibility of magnetic fluids can also be controlled by an external electric field. This phenomenon can be used to detect the formation of clusters of nanoparticles in an electric field.

It was found that the electrical breakdown voltage could not be improved with all types of nanoparticles. Analyzing the results, it was concluded that the cause of the unimproved breakdown voltage of the oil is the inefficient space charge trapping on the surface of the nanoparticles due to the surfactant layer and due to the poor dielectric contrast. On the other hand, the presence of stabilized iron oxide nanoparticles can significantly suppress partial discharges in mineral oil, but not in liquefied natural gas. The structuring of nanoparticles in oil under the influence of external magnetic and electric fields was proven by neutron and X-ray methods. Knowing the structure of nanoparticles in nanofluids at the interface with a solid body contributes to the understanding of heat transport from a solid body to a nanofluid. Structural effects in the nanofluid at the interface with the potential-loaded electrical conductor can help understanding the initiation of electrical breakdown in nanofluids.

As a part of this project, a single-phase transformer with a nominal power of 5 kVA was constructed. The prepared nanofluids were applied in this transformer as a cooling and insulating medium. Temperature rise tests of the transformer revealed that the application of magnetic fluids in the transformer yields a lower temperature rise as compared to the effect

from pure oil. However, this only applies to magnetic fluids with low magnetization of saturation. At higher values magnetization of saturation there is a strong interaction of the magnetic fluid with the magnetic field of the transformer, which results in blockage of the liquid flow and ineffective cooling. A significant decrease in transformer temperature rise up to 8°C was achieved in a nanofluid based on liquefied natural gas and C60 fullerene nanoparticles. Nanofluids with this type of nanoparticles also exhibit lower dielectric losses than oil.

The obtained results fulfilled all the set objectives of the project.