

Matej Vaľko, Michal Rajňák, Ľubomír Pallaj, Daniel Danci, Cristian Barz, Emilia Chira, Juraj Kurimský

Vplyv teploty a tlaku na elektrickú pevnosť transformátorového oleja

Pridaním nanočastíc do čistých transformátorových olejov môžeme výrazne zvýšiť ich elektrickú pevnosť. Tento článok vyšetruje vplyv konkrétnej koncentrácie nanočastíc magnetitu (Fe_3O_4) rozptýlených v čistom transformátorovom oleji Shell Diala S5 na veľkosť preskokového napätia pri konštantnej medzielektródovej vzdialenosti a meniacom sa atmosférickom tlaku a teplote v stanovenom rozsahu.

Kľúčové slová: striedavé preskové napätie, elektrická pevnosť, nanokvapaliny, nanočastice, magnetit

By adding nanoparticles to pure transformer oils, we can significantly increase their dielectric strength. This article investigates the effect of magnetite nanoparticles (Fe_3O_4) dispersed in pure Shell Diala S5 transformer oil on the magnitude of AC breakdown voltage at a constant electrode gap and varying atmospheric pressure and temperature within specified limits.

Keywords: AC breakdown voltage, dielectric strength, nanofluids, nanoparticles, magnetite

I. ÚVOD

Z výsledkov prieskumu spoľahlivosti transformátorov pracovnej skupiny WG A2.37 [1] vyplýva, že dielektrické poruchy môžu za väčšinu porúch transformátorov. Tento, a iné údaje o poruchách vysokonapäťových zariadení majú kritický význam pre prevádzkovateľov prenosovej a distribučnej sústavy, dodávateľov elektrickej energie a výrobcov týchto zariadení. Pre spomenuté subjekty môžu byť tieto údaje podkladom pre nákup vysokonapäťových zariadení, stratégiu údržby a diagnostiky existujúcich zariadení a môžu tiež slúžiť ako referencia pri hodnotení ich spoľahlivosti. Štatistickým vyhodnotením prevádzkových udalostí na elektroenergetických zariadeniach je možné identifikovať charakteristické prevádzkové vzorce, čo uľahčuje predpovedanie potenciálnych porúch. Výrobcovia môžu z týchto údajov čerpať pri optimalizácii konštrukcie nových zariadení, čo môže zvýšiť konkurencieschopnosť a ziskovosť ich produktov na trhu [2].

II. AKTUÁLNY STAV VÝSKUMU V OBLASTI PRESKOKOVÝCH NAPÄTÍ

V nasledujúcej časti sú analyzované 4 štúdie od zahraničných a domácich autorov, ktoré vyšetrujú vplyv teploty a tlaku na hodnotu preskokového napätia (resp. na elektrickú pevnosť) v rôznych typoch izolačných kvapalín.

VPLYV TEPLoty NA PRESKOKOVÉ NAPÄTIE

Muangpratoom a kol. [3] skúmali vo svojej štúdií vplyv teploty na hodnotu preskokového napätia v rôznych typoch nanokvapalín na báze minerálneho oleja, konkrétne s nanočasticami TiO_2 a BaTiO_3 v koncentráciách 0,01 % a 0,03 %, ako aj v čistom minerálnom oleji. Meranie bolo realizované pomocou zariadenia umožňujúceho testovanie podľa normy IEC 60156 s reguláciou teploty využitím PID regulátora. Meranie sa uskutočnilo pri teplotách $T = 35^\circ\text{C}$; 40°C ; 50°C ; 60°C ; 70°C ; 80°C a 90°C . Pre každú kombináciu teplota/nanokvapalina bolo vykonaných 6 meraní, z ktorých bola vyhodnotená priemerná hodnota preskokového napätia.

Výsledky autorov ukazujú, že vo všetkých prípadoch dochádza so zvyšujúcou sa teplotou k nárastu preskokového napätia. K najvýraznejšiemu zlepšeniu oproti čistému minerálnemu oleju došlo

pri nanokvapaline s BaTiO_3 s koncentráciou 0,03 % a teplotou 60°C . Nárast veľkosti preskokového napätia bol približne 38 % ($U_{\text{mineral}} = 53,1 \text{ kV}$ a $U_{\text{BaTiO}_3} = 73,2 \text{ kV}$). Autori pripisujú zlepšenie izolačných vlastností tohto typu nanokvapalín zníženiu viskozity, obsahu vlhkosti a narušeniu výbojového procesu vplyvom chaotického pohybu nanočastíc.

V štúdií od Abd – Elhadyho a kol. [4] bol analyzovaný vplyv teploty na hodnotu preskokového napätia v nanokvapaline dopovanej nanočasticami ZrO_2 na báze minerálneho transformátorového oleja Nynas. Tieto nanočastice boli v objeme základnej kvapaliny dispergované ultrazvukom v 4 rôznych hmotnostných koncentráciách: 0,001 %w; 0,002 %w; 0,003 %w a 0,006 %w. Teploty vzoriek počas meraní boli $T = 50^\circ\text{C}$; 80°C a 130°C . Použitý elektródový systém pre meranie pozostával z tzv. hubových (z angl. *mushroom*) elektród s nastavenou medzielektródovou vzdialenosťou $d = 2 \text{ mm}$. Tento systém bol napájaný striedavým zdrojom s priemyselnou frekvenciou $f = 50 \text{ Hz}$ a maximálnym výstupným napätím $U_{\text{MAX}} = 60 \text{ kV}$. Meranie bolo pre každú z kombinácií teplota/koncentrácia nanokvapaliny vykonané 10–krát s jednodminúťovým intervalom medzi jednotlivými meraniami.

Z výsledkov autorov vyplýva, že prítomnosť nanočastíc ZrO_2 vedie k zvýšeniu priemernej hodnoty preskokového napätia v porovnaní s čistým minerálnym olejom. Najväčší nárast tejto priemernej hodnoty, približne o 31 %, bol zaznamenaný pri koncentracii nanokvapaliny 0,001 %w a teplote 130°C (z $U_{\text{mineral}} = 40 \text{ kV}$ na $U_{\text{ZrO}_2} = 52,5 \text{ kV}$). Najnižší pozorovaný nárast, 25 %, sa vyskytol pri koncentracii 0,003 % a teplote 80°C (z $U_{\text{mineral}} = 28 \text{ kV}$ na $U_{\text{ZrO}_2} = 35 \text{ kV}$). Autori štúdie konštatujú, že s výnimkou maximálneho a minimálneho percentuálneho nárastu veľkosti preskokového napätia bolo výraznejšie zlepšenie izolačných vlastností pri nižších teplotách nanokvapalín. Zároveň sa ukázalo, že pri nanokvapalinách s nižšou koncentráciou ZrO_2 dochádza k elektrickému preskoku pri vyššom napätí. Tento efekt je pripisovaný schopnosti nanočastíc viazať elektrický náboj a absorbovať vlhkosť, pričom ich účinnosť v spomenutých činnostiach klesá so zvyšujúcou sa teplotou.

TABUĽKA I

Výsledky výskumov v oblasti vplyvu teploty na veľkosť preskokového napätia

Základná kvapalina	Typ nanočastíc	Koncentrácia	Teplota	Relatívne zlepšenie U_{BDV}	Referencia
MO	TiO ₂ , BaTiO ₃	0,03 % (BaTiO ₃)	60 °C	38 %	[3]
MO	ZrO ₂	0,01 %w	130 °C	31 %	[4]

VPLYV TLAKU NA PRESKOKOVÉ NAPÄTIE

Norgard a kol. [5] sa vo svojej štúdií zaoberajú analýzou prieraznej pevnosti syntetického kvapalného izolantu na báze polyalfaolefinov (PAO) pri použití vo vysokotlakových spínačoch. Experiment prebiehal pri tlakoch oleja v rozsahu 0,5 až 10 MPa s variabilným krokom, a 3 definovaných medzielektródových vzdialenostiach: 0,5 mm; 0,75 mm a 1 mm. Meranie bolo pri každej kombinácii tlaku a vzdialenosti opakované 450-krát, čím bola zabezpečená vysoká vierohodnosť dosiahnutých výsledkov. Autori experiment realizovali použitím špeciálne navrhnutého systému optimalizovaného na skúmanie dynamiky kvapalných dielektrík vystavených impulznému elektrickému namáhaniu. Nabíjanie kondenzátorovej batérie prebiehalo cez elektrický odpor, pričom jej vybijanie do primárneho vinutia impulzného transformátora je iniciované plynovou triódou. Týmto transformátorom dosiahneme 10-násobné zvýšenie výsledného výstupného napätia, ktoré je vyvádzané na vysokotlakový spínač použitím vhodne navrhnutého prepojenia.

Na základe výsledkov uvedených v publikácií môžeme konštatovať, že priemerná hodnota prieraznej pevnosti skúmanej vzorky syntetického oleja na báze PAO vykazuje nelineárny nárast s jeho narastajúcim tlakom a zmenšujúcou sa medzielektródovou vzdialenosťou. Tento nárast pevnosti koreluje s rastúcou hodnotou preskokového napätia medzi elektródami. Autori interpretujú tieto výsledky ako dôsledok zhoršených podmienok pre tvorbu plyných bublín v objeme oleja, ktoré podľa ich záverov zohrávajú zásadnú úlohu pri iniciácii elektrického výboja.

Kúdelčík a kol. [6] sa vo svojom výskume zamerali na experimentálne stanovenie jednosmerného preskokového napätia v transformátorovom oleji ITO 100 pri rôznych hodnotách jeho tlaku. Na meranie využili vysokonapäťový jednosmerný systém HT 55 – I, schopný generovať výstupné napätie až do 55 kV s konštantnou rýchlosťou nárastu 2 kV/s. Výstup tohto systému bol pripojený na sférické medené elektródy ponorené v oleji ITO 100 s polomerom zakrivenia $r = 35$ mm, medzi ktorými bola nastavená medzielektródová vzdialenosť $d = 1,2$ mm; 1,8 mm a 2,1 mm. Každé meranie bolo realizované 7-krát, pričom pri spracovaní nameraných hodnôt bola z uvedenej množiny vyradená najnižšia a najvyššia zaznamenaná hodnota. Tlak v meracej nádobe bol nastavovaný manuálne s variabilnou veľkosťou kroku v rozsahu 1 až 10 bar. Po každom z výbojov bol olej homogenizovaný použitím magnetického miešadla po dobu 5 minút.

Z výsledkov experimentu prezentovaných autormi vyplýva, že preskokové napätie v transformátorovom oleji ITO 100 narastá so zvyšujúcim sa tlakom, pričom jeho maximálna hodnota bola zaznamenaná pri tlaku $p = 7$ bar a medzielektródovej vzdialenosti $d = 2,1$ mm, kedy dosiahla hodnotu $U_{MAX} = 44$ kV. Táto závislosť naznačuje, že zvýšený tlak vedie k zmenšeniu strednej voľnej dráhy elektrónov λ , čo má priamy dopad na efektivitu ionizačného procesu a tým aj na veľkosť preskokového napätia v skúmanej vzorke oleja.

TABUĽKA II

Výsledky výskumov v oblasti vplyvu tlaku na veľkosť preskokového napätia

Základná	Vzdialenosť	Tlakový	Relatívne	Referencia
----------	-------------	---------	-----------	------------

kvapalina	elektród d	rozsah	Zlepšenie U_{BDV}	
PAO	0,5; 0,75; 1 mm	0,5 – 10 MPa	12 % ($d = 0,5$ mm)	[5]
ITO 100	1,2; 1,8; 2,1 mm	1 – 10 bar	65 % ($d = 2,1$ mm)	[6]

III. MATERIÁLY A METÓDY

Časť „Materiály a metódy“ opisuje postup pri príprave vzoriek magnetických nanokvapalín, metodiku plnenia do nádoby s elektródovým systémom, ako aj špecifikáciu samotného elektródového systému a použitej meracej inštrumentácie.

Pôvodný experiment je modifikáciou normy IEC 60156 [7] pre meranie preskokového napätia v kvapalných dielektrikách s modifikáciou v parametroch ako:

- doba nárastu priloženého napätia U ;
- medzielektródová vzdialenosť d , tvar použitých elektród;
- počet opakovaní merania N ;
- časový úsek medzi meraniami t ;

PRÍPRAVA NANOKVAPALÍN

Ako základná zložka skúmaných magnetických nanokvapalín bol použitý izolačný olej Shell Diala S5 BD vyrábaný zo zemného plynu technológiou GTL (Gas to Liquid). V porovnaní s konvenčnými izolačnými olejmi ponúka vyššiu životnosť, pričom je zaručená plná kompatibilita so zariadeniami v prevádzke [8, 9].

Magnetické nanokvapaliny na báze oxidov železa (Fe₃O₄) boli pripravené tzv. dvojstupňovou metódou na Ústave experimentálnej fyziky SAV v Košiciach. Dostupné boli 3 varianty tejto nanokvapaliny s rôznymi hmotnostno – objemovými koncentraciami Fe₃O₄: 0,05 %w/V; 0,1 %w/V a 0,5 %w/V. Na účely nášho experimentu bola vybraná vzorka s najvyššou koncentráciou.

Samotné nanočastice magnetitu (Fe₃O₄) boli syntetizované metódou chemickej koprecipitácie (t. j. spoluzrážania), ktorú bližšie popisuje publikácia Vékása a kol. [10]. Dlhodobá stabilita nanokvapalín bola zaručená adsorbovaním kyseliny olejovej (tzv. surfaktantu na povrch nanočastíc pri rozsahu teploty 80 – 100 °C. Nanočastice boli po príprave rovnomerne rozptýlené v základnej kvapaline použitím ultrazvuku a miešania [8].

OPIS EXPERIMENTU

Do meracej nádoby z polymetylmetakrylátu boli z bočných stien integrované polguľové elektródy s pevne stanovenou medzielektródovou vzdialenosťou $d = 0,27$ mm.

Na zabezpečenie ohrevu skúmaných vzoriek bolo zo spodnej časti nádoby použitím tepelne a chemicky odolného tmelu pripevnené výhrevné teleso s maximálnym príkonom približne 30 W (pri striedavom napájanom napätí 100 V a prúde 0,3 A), ktoré napájala elektronicky spínaný zdroj GW Instek APS – 7050E.

Teplota skúmaných vzoriek počas experimentu bola sledovaná použitím teplomera FISO s optickým snímačom. Vzorky boli skúmané pri teplotách $T = 25$ °C; 35 °C, 50 °C a 70 °C s hodnotou dovolenej odchýlky $\Delta T = \pm 2,5$ °C. Pri odklone vyššom ako odchýlka ΔT bol experiment pozastavený a vzorky opäť vyhriate (resp. ochladená) tak, aby sa ich aktuálne teploty pohybovali v dovolených medziach.

Tlak vo vnútri tlakovej nádoby so skúmanými vzorkami sledovaný tlakomerom sa počas experimentu pohyboval od atmosférického tlaku (resp. 0,0 bar) až po podtlak s maximálnou hodnotou 0,1 bar (resp. -0,9 bar) na vopred stanovených úrovniach, a to: $p = 0,0$ bar; -0,2 bar; -0,4 bar; -0,6 bar; -0,8 bar a -0,9 bar. Po počiatočnom odsatí vzduchu

z nádoby vývevou na maximálny podtlak boli vykonané merania preskokových napätí pri dohodnutých úrovniach podtlaku. V prípade odchýlok od nich bol tlak korigovaný opätovným zapnutím vývevy, alebo jeho ručne regulovaným prívodom cez guľový ventil.

Meracia zostava bola napájaná prístrojom BAUR Dieltest DTA. Po zapnutí prístroja a pripravení skúmaných vzoriek na experiment je nutné na jeho prednom paneli zvoliť režim testovania tlačidlom „single test“, po ktorom nasledoval výber normy tlačidlom „standard“ určujúcej priebeh výstupného napätia. V našom prípade bola rýchlosť nárastu nastavená na hodnotu 0,5 kV/s. Po dokončení tejto konfigurácie a prepojení výstupu prístroja s mosadznými elektródami na veku tlakovej nádoby bolo meranie spustené stlačením tlačidla „stop/go“.

IV. VÝSLEDKY

Získané výsledky sú v rámci celého experimentu rozlíšené farebne a aj písomným označením nasledovne:

- $p = 0,0$ bar (V_{000}) – nulová odchýlka od atm. tlaku ($p_{ATM} = 1,01325$ bar);
- $p = -0,2$ bar (V_{020}) – minimálny skúmaný podtlak;
- $p = -0,4$ bar (V_{040});
- $p = -0,6$ bar (V_{060});
- $p = -0,8$ bar (V_{080});
- $p = -0,9$ bar (V_{090}) – maximálny skúmaný podtlak;

Merania sa vykonali 20-krát pre každú kombináciu stavových podmienok a izolačných kvapalín, čo v súhrne predstavovalo celkovo 960 meraní preskokového napätia. Získané namerané údaje predstavovali vstupný základ pre výpočet štatistických a iných parametrov.

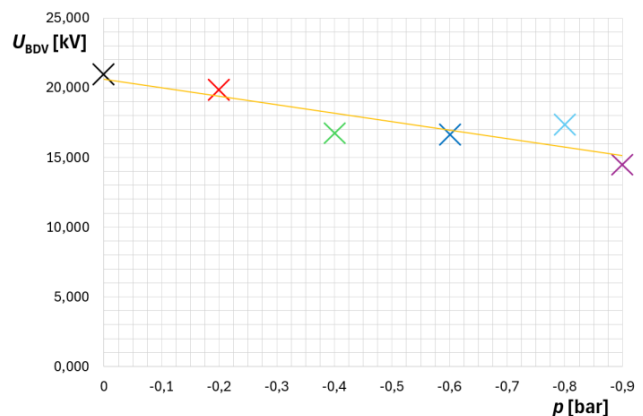
VPLYV TEPLOTY NA ELEKTRICKÚ PEVNOSŤ

Najvýraznejší vplyv teploty na namerané veľkosti preskokového napätia bol zaznamenaný porovnaním hodnôt dosiahnutých pri izbovej teplote (t.j. $T = 25$ °C), a maximálnej teplote $T = 70$ °C za atmosférického tlaku. Pri čistej vzorke transformátorového oleja, ako aj skúmanej vzorke nanokvapaliny bol zaznamenaný rozdiel:

- $\Delta U_{BDV,MAX} = 5,820$ kV – Shell Diala S5 BD;
- $\Delta U_{BDV,MAX} = 5,065$ kV – nanokvapalina Fe_3O_4 (0,5 %w/V).

Z grafu na Obr. 1 vyplýva, že priemerná veľkosť preskokového napätia ($U_{BDV,AVG}$) v čistej vzorke transformátorového oleja Shell Diala S5 BD má s rastúcim podtlakom klesajúci trend, s miernou anomáliou pri podtlaku $p = -0,8$ bar:

- Maximum bolo dosiahnuté pri atmosférickom tlaku s hodnotou $U_{BDV,AVG} = 21,005$ kV;
- Minimum bolo namerané pri podtlaku $p = -0,9$ bar s hodnotou $U_{BDV,AVG} = 14,465$ kV.



Obr. 1: Závislosť veľkosti preskokových napätí vo vzorke Shell Diala S5 BD pri rôznych hodnotách tlaku a konštantnej teplote $T = 70$ °C

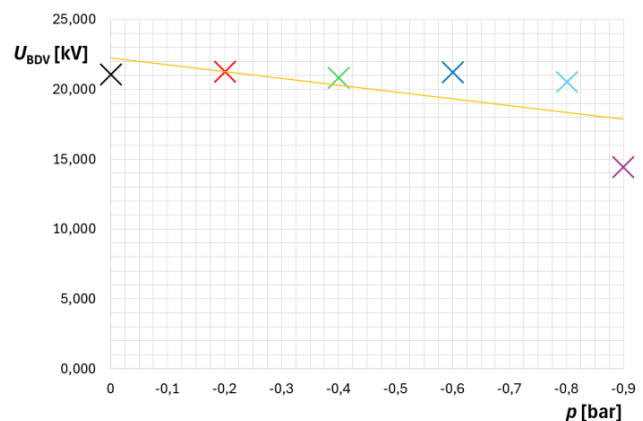
VPLYV TLAKU NA ELEKTRICKÚ PEVNOSŤ

Jasná tendencia poklesu veľkosti preskokového napätia so zmenou tlaku bola pozorovaná pri meraní čistého transformátorového oleja pri teplote $T = 50$ °C a pri magnetickej nanokvapaline pri teplote vzorky $T = 70$ °C. Pri oboch spomenutých bol zaznamenaný maximálny rozdiel:

- $\Delta U_{BDV,MAX} = 8,815$ kV – Shell Diala S5 BD;
- $\Delta U_{BDV,MAX} = 6,845$ kV – nanokvapalina Fe_3O_4 (0,5 %w/V).

Z grafu na Obr. 2 vyplýva, že priemerná veľkosť preskokového napätia ($U_{BDV,AVG}$) vo vzorke magnetickej nanokvapaliny klesá s podtlakom nevýrazne (môžeme hovoriť o určitej stabilizácii jeho veľkosti), s výnimkou pri poslednej skúmanej hodnote podtlaku kedy došlo k výraznejšiemu poklesu:

- Maximum bolo dosiahnuté pri podtlaku $p = -0,2$ bar s hodnotou $U_{BDV,AVG} = 21,260$ kV;
- Minimum bolo namerané pri podtlaku $p = -0,9$ bar s hodnotou $U_{BDV,AVG} = 14,415$ kV.



Obr. 2: Závislosť veľkosti preskokových napätí vo vzorke magnetickej nanokvapaliny pri rôznych hodnotách tlaku a pri konštantnej teplote $T = 70$ °C

DISKUSIA

Vplyv zvýšenej teploty vzoriek na ich elektrické vlastnosti sa prejavil v náraste maximálnych hodnôt preskokového napätia $U_{BDV,MAX}$ pri porovnaní výsledkov získaných pri izbovej teplote a pri zvýšenej teplote $T = 70$ °C za vplyvu atmosférického tlaku. V prípade vzorky čistého transformátorového oleja bol zaznamenaný rozdiel $\Delta U_{BDV,MAX} = 5,820$ kV, zatiaľ čo pri vzorke magnetickej nanokvapaliny dosiahol maximálny rozdiel hodnotu $\Delta U_{BDV,MAX} = 5,065$ kV. Tento nárast medzi nameranými hodnotami môžeme pripísať viacerým fyzikálnym

faktorom súvisiacim so zvyšovaním teploty vzoriek izolačných kvapalín, konkrétne však poklesu ich viskozity, redukcii obsahu vlhkosti v nich a tiež zvýšeniu intenzity chaotického (Brownovho) pohybu častíc v kvapaline. Všetky popísané javy veľkou mierou prispievajú k efektívnejšiemu zachytávaniu elektrického náboja, čím sa v prostredí vzoriek kvapalín vytvárajú menej priaznivé podmienky pre vznik elektrického preskoku.

Najvýraznejší vplyv zmeny tlaku na maximálnu a minimálnu hodnotu preskokového napätia pri meraní čistého transformátorového oleja sa prejavil pri teplote $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, kde rozdiel medzi uvedenými hodnotami dosiahol veľkosť $\Delta U_{BDV,AVG} = 8,815\text{ kV}$. V prípade vzorky magnetickej nanokvapaliny bol najvýraznejší rozdiel pozorovaný pri vzorke s teplotou $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ s rozdielom $\Delta U_{BDV,AVG} = 6,845\text{ kV}$. Zaznamenané zmeny vo veľkosti preskokového napätia môžeme pripisovať prítomnosti plyných bublín na povrchu meracích elektród, ako aj vo vzorkách skúmaných transformátorových olejov. Ďalším významným faktorom ovplyvňujúcim veľkosť preskokového napätia je zmena v dĺžke strednej voľnej dráhy λ .

V. ZÁVER

Tento článok sa zameriaval na analýzu veľkosti preskokového napätia (resp. elektrickej pevnosti) v čistých a nanočasticami magnetitu dopovaných izolačných kvapalinách pod vplyvom zmien teploty a tlaku.

V kontexte Slovenskej republiky a strednej Európy ide o prvý druh tohto výskumu napriek tomu, že vplyv uvedených stavových podmienok je kritický pre prevádzku elektroenergetických zariadení, a zároveň prebieha prvé zavádzanie spomínaných dopovaných izolačných kvapalín do technickej praxe.

Experiment podľa predpokladov potvrdil skutočnosť, že úpravou stavových podmienok je možné ovplyvňovať veľkosť preskokového napätia v izolačných kvapalinách, a tým aj ich elektrickú pevnosť. Tento poznatok je významným východiskovým bodom pre ďalšiu optimalizáciu výskumu izolačných kvapalín pri rovnakých, alebo aj iných prevádzkových podmienkach (vplyv vlhkosti, magnetického poľa, a iné).

POĎAKOVANIE

Tento článok je spracovaný s podporou Slovenskej akadémie vied a Ministerstva školstva v rámci projektov VEGA 1/0380/24 a VEGA 2/0029/24, Agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu APVV-22-0115, a Centra pre rozvoj inovácií v Baia Mare v rámci projektu 2SOFT/1.2/86 „Ro-Ua Cezhraničný rozvoj pre výskum a inovácie“ – RoUaTADRI, financované prostredníctvom spoločného operačného programu Rumusko-Ukrajina 2014–2020. Príspevok je monitorovaným dopadom ukončeného projektu „Inovatívne postupy testovania pre priemysel 21. storočia“, ITMS2014+ 313011T565.

LITERATÚRA

- [1] WG A2.37. *Transformer reliability survey* [online]. B.m.: CIGRÉ. 2015. Dostupné z: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/642-transformer-reliability-survey.html>
- [2] TENBOHLEN, Stefan, Farzaneh VAHIDI a Janine JAGERS. A Worldwide Transformer Reliability Survey. In: *VDE High Voltage Technology 2016; ETG-Symposium: VDE High Voltage Technology 2016; ETG-Symposium* [online]. 2016, s. 1–6 [vid. 2024-11-29]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7776092?arnumber=7776092>
- [3] MUANGPRATOOM, P., A. KUNAKORN, N. PATTANADECH a W. VITTAYAKORN. Effect of Different Temperatures on AC Breakdown Voltage of Mineral Oil based Nanofluids. In: *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON): 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)* [online]. 2018, s. 536–539 [vid. 2025-04-07]. Dostupné z: [doi:10.1109/ECTICon.2018.8620042](https://doi.org/10.1109/ECTICon.2018.8620042)
- [4] ABD-ELHADY, Amr M., Mohammed E. IBRAHIM, T. A. TAHA a Mohamed A. IZZULARAB. Effect of temperature on AC breakdown of nanofilled transformer oil. *IET Science, Measurement & Technology* [online]. 2018, 12(1), 138–144. ISSN 1751-8822. Dostupné z: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1049/iet-smt.2017.0217>
- [5] NORGARD, P. a R. CURRY. An Examination of the Statistics of Breakdown in a Pressurized, Flowing, Synthetic Oil Dielectric. In: *2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference: 2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference* [online]. 2008, s. 202–206 [vid. 2025-01-28]. ISSN 1930-885X. Dostupné z: [doi:10.1109/IPMC.2008.4743616](https://doi.org/10.1109/IPMC.2008.4743616)
- [6] KÚDELČÍK, Jozef a Lukáš VARAČKA. Pressure effects on breakdown in transformer oil ITO 100. In: *2014 ELEKTRO: 2014 ELEKTRO* [online]. 2014, s. 666–669 [vid. 2025-01-28]. Dostupné z: [doi:10.1109/ELEKTRO.2014.6848984](https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2014.6848984)
- [7] IEC 60156:2018 [online]. [vid. 2025-04-11]. Dostupné z: <https://webstore.iec.ch/en/publication/28297>
- [8] KURIMSKÝ, Juraj, Michal RAJŇÁK, Katarína PAULOVIČOVÁ a Miloš ŠARPATAKY. Electric partial discharges in biodegradable oil-based ferrofluids: A study on effects of magnetic field and nanoparticle concentration. *Heliyon* [online]. 2024, 10(7) [vid. 2025-03-07]. ISSN 2405-8440. Dostupné z: [doi:10.1016/j.heliyon.2024.e29259](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29259)
- [9] Shell Dials S5 BD Brochure. B.m.: Shell. 2023
- [10] VÉKÁS, Ladislau, Doina BICA a Mikhail V. AVDEEV. Magnetic nanoparticles and concentrated magnetic nanofluids: Synthesis, properties and some applications. *China Particuology* [online]. 2007, 5(1), Magnetic Particulate Systems, 43–49 [vid. 2025-03-07]. ISSN 1672-2515. Dostupné z: [doi:10.1016/j.cpart.2007.01.015](https://doi.org/10.1016/j.cpart.2007.01.015)

ADRESY AUTOROV

Matej Vaľko, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Másiarska 74, Košice, SK 04010, Slovenská Republika, matej.valko@tuke.sk
 Juraj Kurimský, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Másiarska 74, Košice, SK 04010, Slovenská Republika, juraj.kurimsky@tuke.sk
 Michal Rajňák, Slovenská akadémia vied, Ústav experimentálnej fyziky, Watsonova 47, Košice, SK 04010, Slovenská Republika, rajnak@saske.sk
 Ľubomír Pallaj, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Másiarska 74, Košice, SK 04010, Slovenská Republika, lubomir.pallaj@tuke.sk
 Danci Daniel, Department of Electrical Engineering, Electronic and Computer Technical University of Cluj Napoca, Dr. Victor Babes 62A Baia Mare, RO 430083 Romania danci.to.daniel@student.utcluj.ro
 Barz Cristian, Department of Electrical Engineering, Electronic and Computer Technical University of Cluj Napoca, Dr. Victor Babes 62A Baia Mare, RO 430083 Romania cristian.barz@ieec.utcluj.ro
 Chira Emilia, Department of Electrical Engineering, Electronic and Computer Technical University of Cluj Napoca, Dr. Victor Babes 62A Baia Mare, RO 430083 Romania chira.io.emilia@student.utcluj.ro