

Miloš Šárpataky, Juraj Kurimský, Michal Rajňák, Marek Adamčák

Striedavé preskokové napätie v biodegradovateľných olejoch s prímiesou fullerénu

Abstrakt. Estery ako elektroizolačné kvapaliny používané najmä vo výkonových transformátoroch predstavujú možnú alternatívu k často používaným minerálnym olejom, najmä vďaka ekologickým (vyššia biodegradovateľnosť ako minerálne oleje) a bezpečnostným (vyšší bod vznietenia ako minerálne oleje) aspektom. V tejto štúdií uvádzame experimentálne porovnanie striedavého preskokového napätia v prírodných aj syntetických nanokvapalinách na báze esterov s rôznymi koncentraciami nanočastíc fullerénu (C_{60}). Meranie preskokového napätia sa uskutočnilo s rýchlosťou nárastu striedavého napätia 2,5 kV/s a vzdialenosťou elektród 1 mm. Výsledky ukázali zlepšenie striedavého preskokového napätia iba v jednom prípade nanokvapaliny a to v kombinácii syntetického estera a nanočastíc fullerénu v koncentrácii 0,01%w/v, kde priemerná hodnota \bar{U}_P dosiahla hodnoty o 8,01% vyššie ako v čistom izolačnom oleji. Zvyšné koncentrácie nanokvapalín vykazovali zníženie \bar{U}_P od 9% pri kombinácii prírodného estera s nanočasticami fullerénu s koncentraciou 0,01%w/v do 41,3% pri syntetickom estere s koncentraciou nanočastíc 0,02%w/v. Maximálna nameraná hodnota striedavého preskokového napätia 43 kV bola nameraná v čistom prírodnom esteri MIDEL eN 1204 a naopak minimálna nameraná hodnota 14,9 kV bola nameraná na vzorke s koncentraciou nanočastíc 0,03%w/v v syntetickom esteri MIDEL 7131.

Kľúčové slová: nanokvapalina, preskokové napätie, ester, fullerén

I. ÚVOD

Kvapalné izolácie vo vysokonapäťových zariadeniach, najmä vo výkonových transformátoroch napredujú a za hlavné ciele výskumu môžeme považovať zmenšenie rozmerov, zlepšenie účinnosti, spoľahlivosti, životnosti, bezpečnosti a znižovania dopadov na životné prostredie [1], [2]. Preto sa čoraz častejšie využívajú syntetické estery (SE) a prírodné estery (PE), ktoré majú dobrú biodegradovateľnosť (SE približne 89% a PE okolo 97%) a vyššie body vznietenia v porovnaní s väčšinou používaných minerálnych olejov (MO) [3], [4]. V rámci trvalo udržateľného rozvoja sú distribučné transformátory plnené esterami vhodnou voľbou ako splniť rastúce požiadavky na elektrickú energiu a návrh transformátorov na báze esterov sa stáva bežnou praxou [5], [6]. Jedným zo spôsobov ako doceliť zlepšené vlastnosti izolačných kvapalín je prídanie nanočastíc (vznik nanokvapalín). Nanokvapaliny sú preto jednou z perspektívnych alternatív na izoláciu a chladenie vysokonapäťových zariadení. Záujem o túto tému rastie a preto je stále viac výskumov v oblasti zlepšenia izolačných a chladiacich vlastností [7]. Výskum nanokvapalín zahŕňa mnoho kombinácií základných kvapalín a rôznych nanočastíc s cieľom nájsť optimálne kombinácie a ich optimálne koncentrácie pre konkrétnu aplikáciu [8], [9]. Výskum nanokvapalín sa v poslednej dobe zameriava hlavne na kombinácie biodegradovateľných olejov s nanočasticami a ich možnou aplikáciou vo vysokonapäťových zariadeniach [10]. Tento článok sa venuje striedavému preskokovému napätiu v nanokvapalinách, ktoré sú tvorené kombináciou prírodného a syntetického estera s nanočasticami fullerénu.

Szcześniak a kol. [11] skúmali PE FR3 s nanočasticami fullerénu. Výsledky ukázali zníženie striedavého preskokového napätia o 10% a 5% pri koncentraciách 500 mg/l a 250 mg/l. Avšak urýchlené starnutie všetkých vzoriek zmenilo ich fyzikálne vlastnosti a porovnanie po starnutí ukázalo zlepšenie až do 23%, čiže je možné konštatovať, že tieto nanokvapaliny sú menej degradované tepelným starnutím ako čisté oleje. Huang a kol. [12] skúmali rovnakú kombináciu PE a nanočastíc fullerénu. Na základe ich výsledkov je možné pozorovať

zvýšenie striedavého preskokového napätia od približne 2% po približne 8% pre koncentrácie 50-150 mg/l, zatiaľ čo vyššie koncentrácie vykazovali pokles hodnoty preskokového napätia. Pre porovnanie nanočastice fullerénu dispergované v MO v tomto článku zlepšili hodnotu striedavého preskokového napätia pri všetkých koncentraciách okrem najnižšej skúmanej 50 mg/l. Najvyššie zlepšenie okolo 21% bolo zistené pri koncentrácii 200 mg/l.

Khelifa a kol. [13] skúmali kombináciu SE MIDEL 7131 s nanočasticami fullerénu v koncentraciách 0,1-0,5 g/L. Pri všetkých skúmaných koncentraciách došlo k zlepšeniu striedavého preskokového napätia od 5,49% pri najnižšej koncentrácii 0,1 g/L do 12,67% pri koncentrácii nanočastíc 0,4 g/L (optimálna koncentrácia).

II. POUŽITÉ MATERIÁLY

Základné kvapaliny použité na prípravu nanokvapalín v tomto experimente sú prírodný izolačný olej na báze esterov NE MIDEL eN 1204 (repkový olej) a syntetický izolačný olej na báze esterov SE MIDEL 7131. Fyzikálno-chemické vlastnosti nosných kvapalín sú uvedené v Tabuľke I..

TABUĽKA I
Fyzikálno-chemické vlastnosti základných kvapalín

Veličiny	MIDEL 7131	MIDEL eN 1204
Hustota pri 20°C (g/cm ³)	0,97	0,92
Viskozita pri 40°C (mm ² /s)	29	8
Bod tuhnutia (°C)	-56	-31
Bod vzplanutia (°C)	260	>315
Bod vznietenia (°C)	316	>350
Číslo kyslosti (mg KOH/g)	<0,03 mg	0,04

Nanokvapaliny s nanočasticami fullerénu C₆₀ boli vyrobené pomocou práškového fullerénu s čistotou 99,5% (Merck) bez akejkoľvek ďalšej úpravy. Prášok bol homogénne dispergovaný v základných olejoch pomocou ultrazvuku pri teplote 60°C počas 4 hodín. Pre každý olej boli pripravené tri vzorky s koncentráciou od 0,01%w/v do 0,03%w/v. Nanokvapaliny s nanočasticami fullerénu boli vyhotovené na ústave experimentálnej fyziky SAV v Košiciach. Koncentrácie jednotlivých vzoriek sú uvedené v Tabuľke II.

TABUĽKA II
Prehľad typov a koncentrácií testovaných nanokvapalín

Základná kvapalina	Nanočastice	Koncentrácia nanočastíc v základnej kvapaline (w/V)
PE	-	-
PE	C ₆₀	0,01%w/v
PE	C ₆₀	0,02%w/v
PE	C ₆₀	0,03%w/v
SE	-	-
SE	C ₆₀	0,01%w/v
SE	C ₆₀	0,02%w/v
SE	C ₆₀	0,03%w/v

III. EXPERIMENTÁLNE METÓDY

Na meranie striedavého preskokového napätia U_P izolačných kvapalín bol použitý prístroj BAUR Dieltest DTE s maximálnym skúšobným napätím U_{AC-max} = 100 kV. Vzďialenosť medzi elektródami hubovitého tvaru počas merania sa udržiavala na hodnote s = 1 mm (± 0,025 mm). Pri meraní bol zvolený nárast napätia s krokom ΔU = 2,5 kV/s. Meranie bolo opakované 30 krát s pauzou medzi meraniami t = 2 min.

IV. EXPERIMENTÁLNE VÝSLEDKY

Vyhodnotenie základných údajov merania bolo vykonané pomocou výpočtu percentuálneho podielu konkrétnej zmeny priemeru U_P skúmanej vzorky voči strednej hodnote U_P čistej základnej kvapaliny (v texte nižšie sa píše ako Zmena) a rozptylu.

Nech \bar{U}_{NK} a \bar{U}_{CK} označujú stredné hodnoty preskokového napätia vzorky nanokvapaliny, respektíve čistej nosnej kvapaliny. Potom je percento zmeny U_P v dôsledku pridaných nanočastíc

$$Zmena = (\bar{U}_{NK} - \bar{U}_{CK}) / \bar{U}_{CK} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Kladná percentuálna zmena znamená zlepšenie (zvýšenie) U_P, negatívna znamená jej zníženie. Priemerná hodnota \bar{U}_P a štandardná odchýlka σ sú dané všeobecnými tvarmi.

V Tabuľke III sú výsledky merania striedavého preskokového napätia.

TABUĽKA III
Výsledky merania striedavého preskokového napätia

Základná kvapalina	Nanočastice	Koncentrácia nanočastíc v základnej kvapaline (w/V)	Priemerná hodnota (kV)	Zmena (%)	Rozptyl ((kV) ²)
PE	-	-	32,52	-	19,161
PE	C ₆₀	0,01%w/v	32,23	-9	8,651
PE	C ₆₀	0,02%w/v	26,81	-21,3	16,957
PE	C ₆₀	0,03%w/v	27,26	-19,3	21,558
SE	-	-	33,46	-	23,043
SE	C ₆₀	0,01%w/v	36,14	8,01	9,742
SE	C ₆₀	0,02%w/v	23,68	-41,3	29,047
SE	C ₆₀	0,03%w/v	24,86	-34,59	21,320

U prírodného estera MIDEL eN 1204 pridaním nanočastíc došlo k zhoršeniu hodnôt preskokového napätia U_P u všetkých vzoriek nanokvapalín, ktoré zdieľali rovnaký prírodný ester ako základnú kvapalinu. Vychádzajúc z priemernej hodnoty preskokových napätí \bar{U}_P možno pozorovať, že pri koncentrácii 0,01%w/v je zmena preskokového napätia o -9% v porovnaní s čistým esterom MIDEL eN 1204. Prírodný ester s 0,02%w/v koncentráciou fullerénu mal nižšie priaznivé napätie o 21,3%, pričom táto koncentrácia spomedzi ostatných vykazovala najnižšiu hodnotu \bar{U}_P . Nanokvapalina s koncentráciou nanočastíc 0,03%w/v dosiahla pokles \bar{U}_P o hodnotu 19,3% voči čistému prírodnému esteru. Najmenší rozptyl s hodnotou 8,651 (kV)² možno pozorovať u nanokvapaliny MIDEL eN 1204 s 0,01%w/v koncentráciou nanočastíc.

Syntetický ester MIDEL 7131 dosiahol vyššiu priaznivú pevnosť pridaním nanočastíc pri 0,01%w/v koncentrácii fullerénu oproti čistému syntetickému esteru. Hodnota preskokového napätia pri tejto koncentrácii C₆₀ vzrástla o 8,01% v porovnaní s čistým SE MIDEL 7131. Vzorky nanokvapalín s koncentraciami 0,02%w/v, resp. 0,03%w/v dosiahli zmenu -41,3%, resp. -34,59% preskokového napätia v porovnaní s čistým syntetickým esterom. Najnižšiu hodnotu rozptylu 9,742 (kV)² dosiahla vzorka nanokvapaliny MIDEL 7131 v 0,01%w/v koncentrácii C₆₀.

Spomedzi všetkých testovaných vzoriek nanokvapalín odolala vzorka SE MIDEL 7131 s nanočasticami C₆₀ v koncentrácii 0,01%w/v najvyššej hodnote aplikovaného striedavého napätia. Syntetický ester MIDEL 7131 vrátane nanočastíc fullerénu v koncentrácii 0,02%w/v dosiahol zo všetkých testovaných vzoriek prírodného i syntetického estera najnižšie hodnoty preskokového napätia.

Grafické závislosti uvedené na Obr. 1 znázorňujú ako sa hodnoty preskokového napätia vyvíjali v priebehu merania. Namerané body krivky každej koncentrácie esterov boli fitované trendovou lineárnou priamkou, ktorej matematická rovnica je uvedená v legende. Trendová spojnice s minimálnou hodnotou smernice priamky naznačuje, že vývoj hodnôt preskokového napätia má stabilný charakter. Vzhľadom na chybovosť fitovania je príklad estera MIDEL eN 1204 s 0,03%w/v koncentráciou nanočastíc C₆₀ výnimkou. Malá hodnota smernice priamky v tomto prípade nedokázala potvrdiť zhodnosť porovnania so

štatistickým parametrom rozptylu. Hodnoty preskokového napätia oscilovali nad resp. pod fitovacou priamkou v závere merania periodicky.

Smernica priamky trendovej spojnice, ktorej hodnota je spomedzi ostatných koncentrácií nanokvapalín maximálna udáva rastúci trend – zvyšovanie hodnôt preskokového napätia s rastúcim počtom aplikovaných skúšok. V našom prípade sa jedná o vzorku syntetického estera MIDEL 7131 s 0,02%w/v koncentráciou nanočastíc. U tejto vzorky je predpoklad, že s nárastom počtu preskokov budú hodnoty preskokového napätia nanokvapaliny rásť.

Porovnanie vývoja preskokov medzi koncentraciami prírodného estera MIDEL eN 1204 a syntetického estera MIDEL 7131 naznačuje, že syntetický ester pri koncentraciách nanočastíc 0,02%w/v a 0,03%w/v zaznamenáva výrazný nárast preskokového napätia vzhľadom na počet aplikácií napätí skúškami v porovnaní s totožnými koncentraciami nanočastíc, avšak s inou základnou kvapalinou MIDEL eN 1204.

Grafické závislosti rovnakého typu boli spracované aj v publikácii od V. Timoshkina a kol. [14]. Experiment v tejto publikácii bol meraný v nádobe so sférickými elektródami a medzielektrodovou vzdialenosťou 1 mm pre čistý syntetický ester MIDEL 7131. Vzájomným porovnaním možno konštatovať, že naša vzorka estera vykazuje s nárastom meracích pokusov postupný rast, pričom namerané údaje v publikácii kulminujú bez náznaku rastúceho trendu. Z tohto porovnania vyplýva, že pre všetky naše vzorky izolačných kvapalín má priaznivý vplyv ustálenie vzorky v nádobe s elektródovým systémom v rámci nárastu hodnôt preskokového napätia.

V PE MIDEL eN 1204 a jeho nanokvapalinách dosiaľ čistý ester maximálnu hodnotu U_p 43 kV. Najnižšiu hodnotu spomedzi vzoriek PE s nanočasticami fullerénu dosiahla nanokvapalina s koncentraciou 0,03%w/v a to 17 kV. Maximálnu hodnotu spomedzi nanokvapalín dosiahla vzorka s koncentraciou nanočastíc C_{60} 0,01%w/v a to 37,4 kV. Čistý syntetický ester MIDEL 7131 dosiaľol spomedzi vzoriek s touto základnou kvapalinou najvyššiu hodnotu 41,7 kV. Minimálna hodnota striedavého preskokového napätia 14,9 kV bola nameraná na vzorke s koncentraciou nanočastíc 0,03%w/v. Spomedzi nanokvapalín bola maximálna hodnota 40,4 kV dosiahnutá pri vzorke s koncentraciou nanočastíc 0,01%w/v.

V. DISKUSIA A ZÁVER

Optimálna koncentrácia nanočastíc v kvapaline je podľa tohto experimentu 0,01%w/v pre obe základné kvapaliny. V prípade SE sa jednalo o zlepšenie priemernej hodnoty striedavého preskokového napätia o 8,01% v porovnaní s čistým olejom. Nanokvapalina s najnižšou koncentraciou v PE zhoršila svoju hodnotu U_p o 9% v porovnaní so základnou kvapalinou a rovnako aj zvýšené koncentrácie oboch esterov zhoršili svoje vlastnosti a negatívna zmena sa pohybovala až do 41,3% pri SE s nanočasticami fullerénu v koncentracii 0,02%w/v. Maximálne hodnoty z jednotlivých meraní boli dosiahnuté čistými olejmi a to 43 kV v PE MIDEL eN 1204 a 41,7 kV v SE MIDEL 7131. Minimálne hodnoty boli namerané v nanokvapalinách oboch esterov s najvyššou koncentraciou 0,03%w/v a to 17 kV pre PE a 14,9 kV pre SE. Z tohto experimentu je zjavné, že lepšie hodnoty striedavého preskokového napätia sa dosahujú pri nižších koncentraciách nanočastíc, čo môže byť spôsobené rozložením elektrického poľa v kvapaline ovplyvneného množstvom nanočastíc ako nosičov náboja medzi elektródami. Pre určenie vhodných vzoriek na testovanie v praxi sú nutné ďalšie experimenty, zamerané na ďalšie

elektroizolačné vlastnosti ako impulzné preskokové napätie, alebo stratový činiteľ tg δ .

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie v rámci projektu VEGA 2/0011/20 a Agentúrou na podporu vedy a výskumu v rámci projektu APVV 18/0160.

LITERATÚRA

- [1] RAFIQ, M. et al. Use of vegetable oils as transformer oils – a review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52, s. 308–324. .
- [2] RAFIQ, M. et al. Transformer oil-based nanofluid: The application of nanomaterials on thermal, electrical and physicochemical properties of liquid insulation-A review. In *Ain Shams Engineering Journal*. 2020. s. S2090447920301805. .
- [3] ROZGA, P. Properties of new environmentally friendly biodegradable insulating fluids for power transformers. In *1st Annual International Interdisciplinary Conference*. 2013. .
- [4] ŠÁRPATAKY, M. et al. Dielectric Fluids for Power Transformers with Special Emphasis on Biodegradable Nanofluids. In *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11, no. 11, s. 2885. .
- [5] MONTERO ROMERO, A. et al. Dielectric Design of Ester-Filled Power Transformers: AC Stress Analysis. In *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2022. Vol. 37, s. 2403–2412. .
- [6] VILLARROEL, R. et al. Moisture dynamics in natural-ester filled transformers. In *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 124, s. 106172. .
- [7] RAFIQ, M. et al. The impacts of nanotechnology on the improvement of liquid insulation of transformers: Emerging trends and challenges. In *Journal of Molecular Liquids*. 2020. Vol. 302, s. 112482. .
- [8] AMIN, D. et al. Recent Progress and Challenges in Transformer Oil Nanofluid Development: A Review on Thermal and Electrical Properties. In *IEEE Access*. 2019. Vol. 7, s. 151422–151438. .
- [9] LV, Y.Z. et al. Recent progress in nanofluids based on transformer oil: preparation and electrical insulation properties. In *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2014. Vol. 30, no. 5, s. 23–32. .
- [10] PEREIRA, J.E. et al. The pressing need for green nanofluids: A review. In *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 3, s. 107940. .
- [11] SZCZEŚNIAK, D. - PRZYBYLEK, P. Oxidation Stability of Natural Ester Modified by Means of Fullerene Nanoparticles. In *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 2, s. 490. .
- [12] HUANG, Z. et al. Significantly Enhanced Electrical Performances of Eco-Friendly Dielectric Liquids for Harsh Conditions with Fullerene. In *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9, no. 7, s. 989. .
- [13] KHELIFA, H. et al. AC Breakdown Voltage and Partial Discharge Activity in Synthetic Ester-Based Fullerene and Graphene Nanofluids. In *IEEE Access*. 2022. Vol. 10, s. 5620–5634. .
- [14] TIMOSHKIN, I.V. et al. Dielectric Properties of Diala D, MIDEL 7131 and THESO Insulating Liquids. In *2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2008. s. 622–625. .

ADRESY AUTOROV

Miloš Šárpataky, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, milos.sarpataky@tuke.sk

Juraj Kurimský, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, juraj.kurimsky@tuke.sk

Michal Rajňák, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, rajnak@saske.sk

Marek Adamčák, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK04210, Slovenská Republika, marek.adamcak.2@student.tuke.sk