

Pavol Bartko, Michal Rajňák, Peter Havran, Juraj Kurimský

## Príspevok k dielektrickej pevnosti magnetických kvapalín v jednosmernom elektrickom poli

Príspevok je zameraný na skúmanie elektrickej prieraznej pevnosti transformátorového oleja a magnetických kvapalín pri rôznej rýchlosti nárastu jednosmerného napätia. Magnetická kvapalina na olejovej báze by sa dala použiť ako potenciálna náhrada za minerálny olej, ktorý sa používa ako izolačná a chladiaca kvapalina pre VN zariadenia. Testovali sa tri koncentrácie magnetických kvapalín spolu s transformátorovým olejom MOGUL TRAF0 CZ-A. Merania boli vykonané pomocou elektródového usporiadania hrot - guľa, skonštruované podľa normy IEC 60897.

Kľúčové slová: magnetická kvapalina, transformátorový olej, prierazné napätie

### I. ÚVOD

Izolačné a dielektrické materiály môžeme v dnešnej dobe považovať za neodmysliteľnú súčasť každého elektrotechnického zariadenia. Dokonalá spoľahlivosť a prevádzky schopnosť elektrotechnických zariadení úzko súvisí s kvalitou použitých elektroizolačných materiálov [1]. Na dosiahnutie vysokej kvality izolačného systému sa v prevažnej miere, v elektroenergetike, používa kombinácia olej – papier. S touto kombináciou izolačného systému sa predovšetkým stretávame vo VVN a VN rozvodniach. Kombinácia izolačného systému olej – papier ponúka postačujúcu mechanickú pevnosť, dobrú elektrickú pevnosť a plní zároveň funkciu chladiaceho média. Neustálou diagnostikou takéhoto izolačného systému dokážeme predchádzať poruchám v elektrizačných sieťach alebo nekontrolovaným výpadkom. Preto včasná a hlavne pravidelná diagnostika izolačných systémov prispieva ku spoľahlivosti celej elektrizačnej sústavy.

Neustály rast spotreby elektrickej energie nás núti k prevádzke transformátorov s vyššími výkonmi a s tým sú spojené aj vyššie nároky na elektroizolačný systém výkonového transformátora [1]. Pravdaže, je veľmi dôležité, aby použité elektroizolačné materiály nemali nežiadúci vplyv na životné prostredie. Preto sa neustále hľadá vhodná alternatíva za elektroizolačný systém olej – papier. Uvažuje sa, že vhodnou alternatívou by mohli byť magnetické kvapaliny [2]. V uplynulej dobe sa testujú magnetické kvapaliny na báze inhibovaného transformátorového oleja.

Tento príspevok sa zaoberá hlavne elektrickou prieraznou pevnosťou magnetických kvapalín. Namerané výsledky sme porovnali s čistým transformátorovým olejom a štatisticky vyhodnotili. Elektrickú prieraznú pevnosť magnetických kvapalín sme testovali jednosmernou metódou. Testovali sme tri rôzne koncentrácie nanočastíc, rozptýlených v transformátorovom oleji, s nasledujúcim obsahom nanočastíc oxidu železa (magnetit) 0,05 %, 0,15 % a 0,35 %.

### II. ZÁKLADNÝ PREHĽAD PROBLEMATIKY

Z praxe vieme, že každý výrobok, každá elektrická izolácia alebo vzorka elektroizolačného materiálu dokáže odolávať elektrickému napätiu len do určitej miery, pokým napätie neprekročí kritickú hodnotu a nedôjde ku prierazu danej izolácie alebo materiálu. Takéto napätie, pri ktorom došlo k elektrickému prierazu, voláme prierazné napätie a označujeme ho  $U_p$ . Zodpovedajúcu hodnotu intenzity elektrického poľa v okamihu, kedy prieraz nastal na určitej dráhe prierazu nazývame elektrickou pevnosťou izolantu. Elektrickú pevnosť

označujeme  $E_p$ . Ak hovoríme o homogénnom poli, intenzita je všade rovnaká a môžeme ju vypočítať podľa vzorca [3] [4]:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1)$$

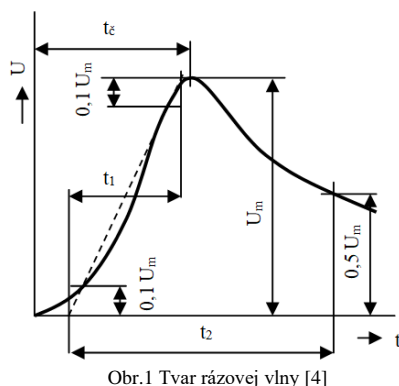
kde  $d$  je medzielektródová vzdialenosť.

Je zrejmé, že stupeň nehomogenity závisí od tvaru a usporiadania elektród, a preto sa stretávame s rôznymi výsledkami elektrickej pevnosti. V praxi majú najväčší význam dva prípady. Prvý prípad je, keď máme dokonale homogénne pole, ktoré sa napríklad vyskytuje medzi dvoma guľovými elektródami a vzdialenosť medzi nimi musí byť menšia ako je priemer jednej guľovej elektródy. Druhý prípad je nehomogénne elektrické pole, ktoré sa vyskytuje vo výskumných centrách alebo laboratóriách, kde máme usporiadanie elektród napríklad hrot – doska. Vďaka tomu môžeme povedať, že všetky prípady nehomogénneho elektrického poľa, s ktorými sa môžeme stretnúť v praxi sa nachádzajú medzi vyššie uvedenými prípadmi. Z toho dôvodu je základným údajom o elektrickom izolante hodnota prierazného napätia alebo elektrická pevnosť, ktorá závisí od vzdialenosti a od elektródového usporiadania hrot – doska alebo guľa – guľa [3].

Pod pojmom prieraz izolačného materiálu rozumieme prudký vzrast jeho elektrickej vodivosti, čím prakticky izolant stráca svoje vlastnosti. Dôsledkom prudkého vzrastu vodivosti, a tým tiež zvýšenia prúdu, ktorý preteká izolantom sú mechanické a tepelné deje. Rozlišujeme dve štádiá prierazu [5]. Do prvého štádia môžeme zaradiť prudký vzrast elektrickej vodivosti a zároveň vzrast prúdu, ktorý preteká miestom, kde došlo k prierazu. Je zrejmé, že izolant už po prvom štádiu stráca vlastnosti izolantu [3] [5]. Druhé štádium prierazu reprezentuje všetky deje, ktoré sa začínú odohrávať po pretekaní elektrického prúdu cez miesto prierazu [5].

Doba pôsobenia napätia a tiež druh napätia sú veľmi dôležité z hľadiska pôsobenia na elektrickú pevnosť. V praxi sa s tým stretávame, že elektrický prieraz izolácie môže nastať aj pri pôsobení komutačných alebo atmosférických prepätí prevádzkového striedavého napätia s priemernou alebo vyššou frekvenciou. Z toho dôvodu treba elektrickú pevnosť merať pri rázovom, jednosmernom a striedavom napätí rôznych frekvencií. Elektrické namáhanie izolácie komutačnými a atmosférickými prepätiami sa simuluje pomocou rázového napätia z rázových generátoroch. Tvar takejto rázovej napäťovej vlny je zobrazený na obr. 1. Základné parametre rázovej napäťovej vlny sú doba čela  $t_c$ , maximálne napätie  $U_m$ , doba poltyla  $t_2$ . Doba poltyla nám

určuje dobu, za ktorú napätie poklesne na 50 % maximálnej hodnoty napätia [4].



Fyzikálna podstata elektrického prierazu izolantov je v každom skupenstve iná. Problematika elektrickej prieraznej pevnosti izolantov je najpodrobnejšie spracovaná z teoretického a experimentálneho hľadiska pre plynné izolanty, a tiež aj pre pevné izolanty. Čo sa týka kvapalných izolantov, táto problematika je zatiaľ najmenej spracovaná [4].

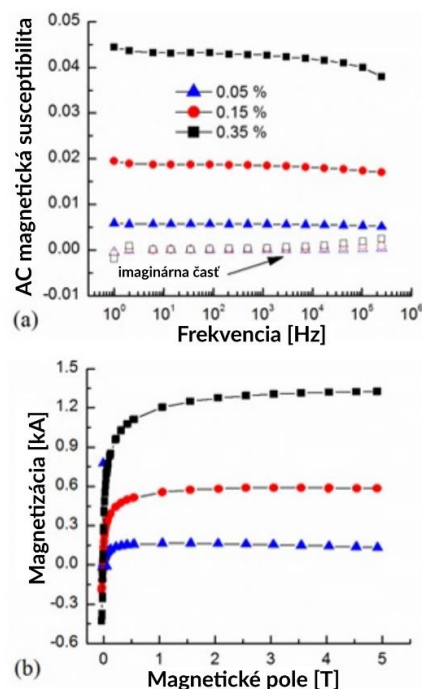
Elektrický prieraz plynných izolantov je spôsobený fotoionizáciou a ionizáciou. V nehomogénnom poli k elektrickému prierazu dochádza po koróne, v homogénnom dôjde k elektrickému prierazu náhle [3].

Elektrický prieraz kvapalných izolantov vzniká v dôsledku ionizačných a tepelných procesov. Dôležité faktory, ktoré napomáhajú elektrickému prierazu sú nečistoty v izolačnej kvapaline, prípadne vniknutie vody do izolačného systému [3].

Elektrický prieraz pevných izolantov býva spôsobený tepelnými alebo elektrickými procesmi, ktoré sa odohrávajú vplyvom elektrického poľa. Čisto elektrický prieraz pevných izolantov predovšetkým súvisí s elektrickými procesmi, ktoré sa odohrávajú v pevnom izolante. Elektrické procesy vznikajú v silnom elektrickom poli, v ktorom dochádza k náhlemu miestnemu vzrastu prúdovej hustoty v okamihu elektrického prierazu. Tepelný prieraz pevných izolantov vzniká pri tepelne elektrickej nerovnováhe v danom pevnom izolante. Pevný izolant sa zahrieva vplyvom dielektrických strát, čo má za následok neustále zvýšenie činiteľa dielektrických strát  $\delta$  so vzrastajúcou teplotou, a tým pádom aj k zvýšeniu teploty pevného izolantu. Nekontrolované zvýšenie teploty môže viesť k tepelnému rozpadu pevného izolantu [5].

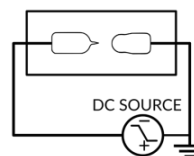
### III. METÓDA MERANIA A POUŽITÉ MATERIÁLY

V experimente sme testovali tri koncentrácie magnetických kvapalín, ktoré boli nariadené z komerčného transformátorového oleja MOGUL TRAF0 CZ-A a z nanočastíc  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  stabilizované kyselinou olejovou. Podrobná príprava magnetických kvapalín je popísaná v inom článku [6]. Vzorky skúmané v tomto príspevku boli nariadené pri teplote pri  $60^\circ\text{C}$ . Ako sme už vyššie spomínali nariadené boli tri rôzne koncentrácie nanočastíc ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 0,05%, 0,15% a 0,35%. V rámci základnej charakterizácie skúmaných magnetických kvapalín je vhodné poukázať na ich magnetické vlastnosti, ktoré sú prezentované na obr.2. Prierazné napätie sme testovali aj na čistom transformátorovom oleji MOGUL TRAF0 CZ-A, z ktorého boli nariadené jednotlivé koncentrácie magnetických kvapalín.



Obr.2 Striedavá magnetická susceptibilita študovaných magnetických kvapalín. Vyplnené symboly predstavujú reálnu časť, zatiaľ čo prázdne zhodujúce sa symboly predstavujú imaginárnu časť (a). Magnetizácia závislá od magnetického poľa pri izbovej teplote (b).

Testy prierazného napätia sa uskutočnili jednosmerným napätím s použitím vysokonapäťového jednosmerného zdroja PTS – 37,5 (High Voltage, USA), ktorý bol pripojený na elektródové usporiadanie ihlanguľa (obr.2a). Všetky vzorky boli testované podľa medzinárodnej normy IEC 60897 s prispôbenou vzdialenosťou elektród nastavenou na 0,5 mm, obr. 3.



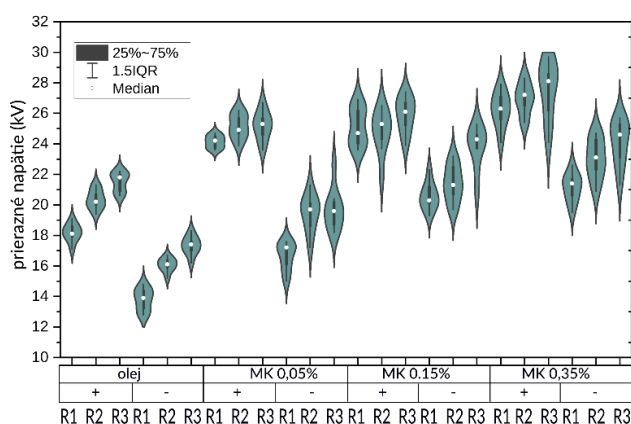
Obr.3 Nákras experimentálnej nádoby s guľovou a ihlovou elektródou

Pre každú testovanú vzorku sme namerali 30 hodnôt prierazného napätia, aby sme získali reprodukovateľnú priemernú hodnotu prierazného napätia a aby sme čo najviac eliminovali štatistickú chybu. Rovnako sme postupovali pre tri rýchlosti nárastu jednosmerného napätia ( $R_1:470 \text{ V/s}$ ,  $R_2:750 \text{ V/s}$ ,  $R_3:1100 \text{ V/s}$ ) a následne sme zmenili polaritu elektród. Po každom nameranom prieraznom napätí sme vzorku premiešali a nechali postáť 2 minúty. Všetky testy sa uskutočnili pri izbovej teplote  $20^\circ\text{C}$ .

### IV. VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Namerané hodnoty prierazného napätia boli štatisticky spracované pre všetky koncentrácie magnetickej kvapaliny a tiež pre čistý transformátorový olej MOGUL TRAF0 CZ-A. Priemerné hodnoty prierazného napätia pre obe polaritu ihly sú uvedené v TABULKE I. Rozdiel prierazných napätí predstavuje rozdiel medzi hodnotami

meranými so záporným resp. pozitívnym potenciálom aplikovaným na ihlu. Štatistická interpretácia výsledkov je graficky znázornená na obr.5. Z grafických závislostí je zrejme, že pri magnetických kvapalinách došlo k prirazu pri vyššej hodnote napätia ako pri čistom transformátorovom oleji. Ďalej pozorujeme, že vyššia koncentrácia nanočastíc priaznivo pôsobí na hodnotu prirazného napätia. Vplyvom zvyšovania rýchlosti nárastu jednosmerného záporného napätia sme zaznamenali zvýšenie hodnôt prirazného napätia.



Obr.5 Štatistická interpretácia účinku zmeny polaritý ihly na prirazné napätie

TABUĽKA 1 Priemerné hodnoty prirazného napätia

Rýchlosť nárastu napätia [V/s]	Prierné napätie pri zápornej polarite na hrote [kV]	Prierné napätie pri kladnej polarite na hrote [kV]
R1	18	14
R2	20	16
R3	21	18
R1	24	16
R2	24	19
R3	25	20
R1	25	20
R2	25	22
R3	26	24
R1	26	22
R2	27	23
R3	28	24

Pri vzorke MOGUL TRAFU CZ-A sme zaznamenali zvýšenie prirazného napätia vplyvom zvýšenia rýchlosti nárastu jednosmerného záporného napätia o 2 kV. Pri magnetických kvapalinách s koncentráciou nanočastíc 0,05% a 0,15% bolo zvýšenie prirazného napätia o 1 kV a pri koncentracii 0,35% maximálne o 1 kV.

Všetky testované vzorky vykazujú vyššie hodnoty prirazného napätia, keď je na ihle privedený záporný potenciál a guľová elektróda je uzemnená. Platí to aj pri porovnaní rôznych rýchlostí nárastu jednosmerného záporného napätia. Na základe predchádzajúcich štúdií je možné usúdiť, že príčinou tohto polaritného efektu je rôzna rýchlosť šírenia negatívneho a pozitívneho strímra. Negatívne strímre rastú pomalšie ako pozitívne [7]. Na obr. 5 je vidieť, že pri každej vzorke sa prejavil polaritný efekt. Pri vzorke MOGUL TRAFU CZ-A, zmenou polaritý elektród nastal pokles prirazného napätia približne o 3,5 kV pre každú rýchlosť nárastu jednosmerného záporného napätia. Pri magnetickej kvapaline 0,05 % sme tiež zaznamenali pokles prirazného napätia vplyvom zmeny polaritý elektród o 4-5 kV pri rýchlosti nárastu napätia s krokom 470 V/s. Tento fenomén sa prejavil aj pri ostatných

vzorkách magnetických kvapalín a pri všetkých rýchlostiach nárastu jednosmerného záporného napätia. Pri ostatných koncentráciách magnetických kvapalín (0,15% a 0,35%) nastal pokles prirazného napätia vplyvom zmeny polaritý elektród približne o 4 kV a 5 kV.

## V. DISKUSIA

Všeobecne je elektrický priraz v transformátorových olejoch dôsledkom tvorby strímrov a ich šírenia medzi elektródami. Strímre sa tvoria v dôsledku ionizácie molekúl oleja vplyvom pôsobenia vysokého elektrického poľa [8]. Keď sa vytvorí pozitívny strím, pozitívne ióny zvyšujú intenzitu elektrického poľa pred hrotom a rozvíjajú ďalšiu ionizáciu, čo vedie k šíreniu strímra a následne k elektrickému prirazu. V prípade záporných strímrov, kladné ióny znižujú intenzitu elektrického poľa medzi elektródami. Šírenie negatívnych strímrov je tak obmedzené a k poruchám dochádza pri vyššej intenzite elektrického poľa [9],[10].

## VI. ZÁVER

V tomto príspevku sme testovali vplyv polaritý elektród a rýchlosť nárastu jednosmerného napätia na hodnotu prirazného napätia alternatívnych izolačných kvapalín. Testy boli vykonané jednosmerným napätím s tromi rýchlosťami nárastu napätia. Testovali sme tri koncentrácie magnetických kvapalín a čistý transformátorový olej. Magnetické kvapaliny boli na báze testovaného transformátorového oleja MOGUL TRAFU CZ-A. Po vyhodnotení nameraných výsledkov sme pri všetkých testovaných vzorkách potvrdili vplyv polaritý elektród na hodnotu prirazného napätia. V prípade záporného potenciálu na ihle sme namerali vyššie hodnoty prirazného napätia ako pri opačnej polarite elektród. Zistili sme, že na hodnotu prirazného napätia má vplyv rýchlosť nárastu jednosmerného napätia a aj koncentrácia nanočastíc rozptýlených a stabilizovaných v nosnej kvapaline. Zistené skutočnosti môžu prispieť k teoretickým poznatkom o priraze v izolačných kvapalinách a pravdaže výskum ponúka otvorenie podrobnejšieho skúmania dielektrických vlastností magnetických kvapalín.

## POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-18-0160.

## LITERATÚRA

- [1] C. Perrier, and A. Beroual, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 25, 6–13 (2009). DOI: 10.1109/MEI.2009.5313705.
- [2] I. Fernández, A. Ortiz, F. Delgado, C. Renedo, and S. Pérez, *Electr. Power Syst. Res.* 98, 58–69 (2013). DOI: 10.1016/j.epsr.2013.01.007.
- [3] J. Drápala, M. Krusa, *Elektrotechnické materiály*, Ostrava, Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2012, INSB 978-80-248-2570-0
- [4] I. Kolcunová, L. Lisoň, J. Tančák.: *Vplyv teploty na elektrickú priraznú pevnosť impregnovanej papierovej izolácie*, [online], Košice, Katedra elektroenergetiky, 2016, [cit 2.10.2019] dostupné na internete : <http://eejournal.feit.tuke.sk/index.php/JSES/article/download/407/445>
- [5] *Elektrická pevnosť izolantov*, [online], Žilinská univerzita v Žiline, Katedra elektroenergetiky a elektrických pohonov, Žilina, [prístup: 8.6.2017], [cit 2.10.2019], dostupné na internete : <http://keep.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/technika%20vn/texty%20vn/01%20Elektrick%C3%A1%20pevnos%C5%A5/02%20ELEKTRICK%C3%A1%20PEVNOS%C5%A4%20IZOLANTOV.docx>
- [6] M. Rajnak, J. Kurimsky, B. Dolnik, P. Kopcansky, N. Tomasovicova, E. A. Taculescu-Moaca, and M. Timko, *Phys. Rev. E* 90, (2014). DOI: 10.1103/PhysRevE.90.032310.

- [7] E. O. Forster, H. Yamashita, C. Mazzetti, M. Pompili, L. Caroli, and S. Patrisi, IEEE Trans. *Dielectr. Electr. Insul.* 1, 440–446 (1994). DOI: 10.1109/94.300287
- [8] J.C. Devins, S.J. Rzed, R.J. Schwabe, *Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids*, J. Appl. Phys. 52 (1981) 4531–4545. doi:10.1063/1.329327.
- [9] R. Bartnikas, ASTM International., *Electrical insulating liquids*, ASTM, pp.452, 1994, ISBN 978-0-8031-2055-6.
- [10] Z. Wang, Y. Zhou, W. Lu, N. Peng, W. Chen, *The Impact of TiO2 Nanoparticle Concentration Levels on Impulse Breakdown Performance of Mineral Oil-Based Nanofluids.*, Nanomater. (Basel, Switzerland). 9 (2019). doi:10.3390/nano9040627.

#### ADRESY AUTOROV

Pavol Bartko, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 04210, Slovenská Republika, [pavol.bartko@tuke.sk](mailto:pavol.bartko@tuke.sk)  
Michal Rajňák, Ústav experimentálnej fyziky Slovenskej akadémie vied, Watsonova 47, Košice, 04001 Slovakia, Slovenská Republika [rajnak@saske.sk](mailto:rajnak@saske.sk)  
Peter Havran, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 04210, Slovenská Republika, [peter.havran@tuke.sk](mailto:peter.havran@tuke.sk)  
Juraj Kurimský, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 04210, Slovenská Republika, [juraj.kurimsky@tuke.sk](mailto:juraj.kurimsky@tuke.sk)