

Ján Zbojovský

Porovnanie prieraznej pevnosti izolačného systému olej-papier na báze prírodných esterov a minerálnych olejov

Tento príspevok sa zaoberá problematikou prieraznej pevnosti izolácie olej – papier. Systém izolácie je zostavený zo vzoriek izolačného papiera, ktoré boli impregnované olejmi ITO 100, MIDEL 7131, Nynas-Lyra X a prírodný rastlinný repkový olej. V článku sú analyzované merania neimpregnovaných vzoriek, ktoré sú porovnávané s impregnovanými vzorkami.

Kľúčové slová: príspevok; izolačný papier prierazná pevnosť, transformátorový olej, rastlinný olej

This paper deals with the issue of breakdown strength in oil-paper insulation. The insulation system consists of samples of insulating paper that have been impregnated with ITO 100, MIDEL 7131, Nynas-Lyra X oils, and natural vegetable rapeseed oil. The article analyzes measurements of non-impregnated samples, which are compared with impregnated samples. **(Comparison of the breakdown strength of oil-paper insulation systems based on natural esters and mineral oils.)**

Keywords: insulating paper, breakdown strength, transformer oil, vegetable oil

I. ÚVOD

Izolačné a dielektrické materiály sú obecné používané k oddeleniu elektricky vodivých materiálov a k zamedzeniu prenosu elektrického náboja. Tieto materiály majú vysokú odolnosť proti elektrickému prúdu a sú schopné izolovať alebo rozptýliť elektrické pole. Jedným z najdôležitejších komponentov každého elektroenergetického zariadenia je jeho izolačný systém. Tento systém má zabezpečovať spoľahlivú a bezpečnú prevádzku daného zariadenia počas celej doby jeho životnosti. Na navrhnutie vhodného izolačného systému, ktorý bude dlhodobo odolávať vplyvom starnutia a namáhania rôznych vonkajších aj vnútorných faktorov je potrebné poznať, aké sú vlastnosti konkrétnych použitých izolačných materiálov a rovnako potrebné je oboznámiť sa s tým ako sa tieto vlastnosti časom menia. Taktiež je dôležité vedieť aké faktory vplývajú na vlastnosti izolačného systému a odvodiť z toho ako ho chrániť proti negatívnym vplyvom. Vo všeobecnosti sa materiály využívajú v izolačných systémoch rozdeľujú na izolanty a dielektriká. V praxi sa uplatňujú aj rôzne kombinácie oboch skupín. Ďalej ich je možné rozdeliť podľa látkového skupenstva na pevné, kvapalné a plynné izolačné alebo dielektrické materiály.[1]

Kombinovaný izolačný systém olej-papier sa v energetickej praxi využíva dlhé obdobie. Najväčšie využitie tohto druhu izolácie sa uplatňuje pri olejom plnených transformátoroch, vysokonapäťových káblach, priechodkách a ďalších elektrických zariadeniach. Obe zložky tohto kombinovaného izolačného systému majú svoje pozitívne aj negatívne vlastnosti. Olej v tejto sústave slúži ako izolačný a chladiaci prostriedok, ale má aj negatívny vplyv na systém tým, že prenáša zložky z vonkajšieho prostredia, ako je vzdušná vlhkosť a kyslík, ktoré výrazne poškodzujú olej aj papier. Olej je zdrojom plynových, kvapalných a pevných produktov, ktoré vznikajú hlavne v dôsledku oxidačného a tepelného starnutia izolačného systému. Pri monitorovaní systému olej-papier sa dá pomocou vhodných diagnostických metód určiť nielen stupeň starnutia izolačného oleja, ale aj druh záťaže, ktorá spôsobila jeho poškodenie.

Zároveň je možné približne určiť stupeň starnutia papiera, čo je dôležité z hľadiska diagnostiky, pretože olej je možné kedykoľvek odobrať počas krátkodobých výpadkov stroja alebo aj počas prevádzky stroja.

Elektro-izolačné papiere sa vyrábajú z buničiny pochádzajúcej z ihličnatých stromov. Hlavnou zložkou buničiny je celulóza, ktorá sa získava z dreva varom a následným oplachovaním vodou s cieľom odstrániť rozpustné soli a iné nečistoty, ktoré nie sú celulózou. Potom sa buničina melie, aby sa vlákna rozdrobili a zmenšili sa ich dĺžka. Izolačné papiere sa vyrábajú z čistej, nebielenej buničiny bez prídavku gleja a plniv. Táto buničina sa používa s veľkým prebytkom vody (100 až 200 násobok), a je privádzaná na nepretržité sito papierenského stroja, na ktorom sa usadzuje v tenkej vrstve a vlákna celulózy sa spojujú. Vlákna sa prevažne orientujú v smere, v ktorom sa pohybuje sieť a vytvára sa pás papiera, takže v tomto smere má papier väčšiu mechanickú pevnosť ako naprieč pásom. Papier má charakteristické vlastnosti, ktoré sú určené chemickou štruktúrou celulózy a prímiesami. Každá štruktúrna jednotka obsahuje tri hydroxylové skupiny OH, ktoré spôsobujú hlavný nedostatok papiera a iných materiálov na báze celulózy, teda mimoriadne vysokú schopnosť prijímať vodu. Vlákna celulózy absorbujú vodu z pary vo vzduchu aj pri nízkych relatívnych vlhkostiach. S narastajúcou vlhkosťou vzduchu sa obsah vody v celulóze mení až do dosiahnutia rovnovážneho stavu. Vlastnosti papiera sú ovplyvnené polárnymi OH skupinami v celulóze a prímiesami. [2][3]

Buničina má vysokú permitivitu, ale vzduchové priestory medzi vláknami znižujú permitivitu papiera. Vlhkosť zhoršuje elektrické vlastnosti papiera, a preto sa papier vždy používa v kombinácii s ďalšími izolantmi, buď kvapalnými alebo pevnými. Elektrická pevnosť papiera nie je príliš vysoká vzhľadom na jeho pórovitosť, pretože nedosahuje pevnosti rovnako hrubej vrstvy vzduchu. Podobne ako ostatné organické izolanty, aj papier postupne starne. Jeho starnutie závisí od teploty, ktorej je pri zaťažení v izolácii vystavený, a preto je limitovaná teplota, pri ktorej môže byť papierová izolácia použitá pri výrobe a v prevádzke. Oxidácia v prítomnosti kyslíka vedie k zvýšeniu kyslosti a pH vodného výluhu. Zhoršovanie

mechanických vlastností celulózy môže nastať aj pri zvýšenej teplote bez prístupu vzduchu, keď dochádza k de-polymerizácii - trhaniu makromolekúl celulózy. Pri teplotách nad 120 až 130°C vznikajú plynné produkty, ktoré vplývajú na izoláciu negatívne. Starnutie sa urýchľuje kyslíčnikmi kovov a zásadami a tiež vodou, ktorá zhoršuje odolnosť papiera voči tepelnému starnutiu a ktorá je aj jedným z produktov vznikajúcich pri starnutí. Keď raz starnutie začalo, prebieha rýchlejšie. Pri sušení papierových izolácií existuje protiklad medzi požiadavkou na vysušenie papiera a potrebou minimalizovať deštrukciu celulózy. Na jednej strane je potrebné použiť vysokú teplotu na odstránenie vlhkosti, avšak na druhej strane vysoké teploty môžu spôsobiť degradáciu celulózy. Preto sa pri sušení používa znížený tlak a teplota, aby bolo sušenie účinnejšie a minimalizovalo sa zničenie celulózy. Okrem týchto parametrov je tiež dôležitá doba sušenia a cieľom sušenia je dosiahnuť obsah vlhkosti v papieri pod 0,1%. [4][5]

Papier má nízku elektrickú pevnosť, avšak táto vlastnosť sa môže zlepšiť impregnáciou, pri ktorej sa kvapalným izolantom nahradí vzduch medzi vláknami celulózy. Po impregnácii sa charakteristické vlastnosti, ako je napríklad schopnosť navlhnúť a zhoršenie elektrických vlastností počas navlhnutia, či tepelné starnutie pri vyšších teplotách, stanovujú zložením papiera a oleja. Permittivita a tg δ papiera sú výsledkom kombinácie vlákien celulózy a impregnanu, ktoré sú zapojené sériovo ako dve dielektriká. Hodnota týchto charakteristík závisí na objemovej hmotnosti papiera, ktorá určuje pomer týchto dvoch zložiek. Papier s vyššou objemovou hmotnosťou sa suší ťažšie a impregnuje horšie, čo obvykle platí pre papier s objemovou hmotnosťou do 1,0 až 1,1 g/[cm]³. Činiteľ dielektrických strát pri normálnej teplote a priemyselnom kmitočte sa pohybuje medzi hodnotami 15 až 25* [10]⁽⁻⁴⁾. Vodivosť kvapalnej zložky izolácie určuje jej príspevok k stratám. Izolácia vinutá z pásky pozostáva z impregnovaného papiera, ktorý má v sebe medzery vyplnené olejom a sú v sérii s ostatnými vrstvami papiera. V smere elektrického poľa je hrúbka oleja v medzerách daná hrúbkou použitého papiera. [5][6]

Pri striedavom a impulznom napätí je olej v medzerách zväčša namáhaný väčším gradientom ako okolité vrstvy impregnovaného papiera. V dôsledku toho sa olej stáva elektricky slabším miestom v izolácii. Ak napätie prekročí hodnotu prierazného napätia olejovej medzery, začnú vznikať výboje v plyne, ktorý sa vylúčil z oleja. Pokiaľ sa napätie nezvyšuje nad určitú hodnotu, výboje v plynových bublinkách pokračujú aj pri nižšom napätí ako ionizačné napätie. Ak bol použitý typ oleja, ktorý pohlcuje plyny v prítomnosti výbojov, a ak napätie nezvyšuje nad ionizačné napätie, vzniknuté plyny sa postupne pohlcujú a výboje zanikajú. V opačnom prípade, ak olej nepohlcuje plyny alebo napätie je príliš vysoké, výboje sa šíria medzi susednými vrstvami papiera, zanechávajúc stromčekovité zuhoľnatené stopy a spájajú blízke olejové medzery, čo vedie k prierazu celej izolácie. Pieraz nastáva skôr, ak napätie na izoláciu je vyššie ako ionizačné napätie. Pri použití izolácie z impregnovaného papiera môže nastať tepelný prieraz v prípade, že dielektrické straty pri napätí prekračujú určitú hodnotu. Preto je dôležité, aby výroba izolácie zahŕňala použitie kvalitného oleja a papiera, ktoré neobsahujú vlhkosť ani iné látky, ktoré by mohli zvýšiť straty a zhoršiť vlastnosti izolácie aj pri dlhodobom používaní. Čím vyššie je napätie, ktoré pôsobí na izoláciu, tým viac záleží na kvalite materiálov, z ktorých je izolácia vyrobená.

Všetky minerálne izolačné oleje sú získané ako jedna frakcia pri destilácii ropy. Avšak, pomocou vhodného spracovania je možné regulovať zloženie výsledného produktu a získať tak jednotlivé druhy izolačných olejov v kvalitnej podobe. Transformátorové oleje tvoria najväčší podiel spotreby kvapalných izolantov. Hlavnou úlohou transformátorového oleja je zabezpečiť účinný odvod tepla a to najmä pomocou konvekcie. To vyžaduje, aby mal olej čo najnižšiu viskozitu, aby bol schopný dobre impregnovat papierovú a vláknitú izoláciu. Avšak, destilačné produkty s nižším bodom varu majú nižšiu viskozitu, ale obsahujú zložky, ktoré sa môžu uvoľniť ako zápalné plyny pri vyšších teplotách. To je nebezpečné z hľadiska požiarnej bezpečnosti transformátora. Preto musí transformátorový olej splňovať požiadavku na minimálnu teplotu, pri ktorej sa neuvoľňujú z oleja zápalné plyny, čo sa označuje ako bod vzplanutia. Tento bod je dôležitý pre bezpečnú prevádzku transformátorov.

Medzi možné náhrady minerálnych olejov patria prírodné estery. Rastlinné oleje sa získavajú najmä zo semien poľnohospodárskych plodín (slnčnica, ľan, ricín, repka olejná a iné), ale na ich výrobu sa bežne používa aj plod palmy olejnej alebo olivy. Vyrábajú sa lisovaním. Podľa použitých technologických procesov rozoznávame rafinované oleje (získané extrakciou pri vysokých teplotách) a tzv. panenské (lisované pri nízkej teplote). Prírodné oleje sú v porovnaní s tradičnými minerálnymi olejmi menej horľavé, netoxické, biologicky rozložiteľné a sú viac hygroskopické t.j. majú väčšiu absorpčnú schopnosť.

Syntetické kvapaliny sú najčastejšie zložené z polyolov. Majú vhodné dielektrické vlastnosti a sú podstatne viac biologicky odbúrateľné než minerálne oleje. Výrobné náklady syntetických esterov sú v porovnaní s minerálnymi podstatne vyššie, preto sa najčastejšie uplatňujú iba v prenosných a trakčných transformátoroch. Prvé praktické využitie syntetických esterov bolo v roku 1984. Použila sa ako náhrada do železničného trakčného transformátora.

Medzi pozitívne vlastnosti syntetických esterov patrí vysoká tepelná stabilita a dobré nízkoteplotné vlastnosti. Existuje sedem hlavných typov syntetických esterov- diester, ftalát, trimellitát, pyromellitát, dimér ester kyseliny, polyoly, a polyoleates. [6]

II. REALIZÁCIA EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ

Pri meraní sa použil izolačný papier o hrúbke 0,06 mm. Na impregnovanie sa použili nasledovné druhy oleja:

1. Prírodný rastlinný olej- repkový, filtrovaný, chemicky upravený
2. ITO 100 – inhibovaný transformátorový olej, vysokorafinovaný
3. MIDEL 7131- syntetický ester
4. Nynas- Lyra X – inhibovaný transformátorový olej.

Na meranie hodnoty prierazného napätia sa použil prístroj DTS-60D, High voltage s rozsahom od 0 do 59,9 kV s 2% chybou merania. Vzorky izolačného papiera boli vložené do nádoby s olejom bez prístupu vzduchu na dobu 24h. Pred meraním každej vzorky nádobka v ktorej sa uskutočňovali merania bola vyčistená. Do nádobky sa nalial rovnaký druh oleja ktorý bol použitý na impregnáciu papiera tak, aby prekryval elektródový systém. (Obr. 1). Vzdialenosť medzi elektródami sa menila počtom vrstiev vloženého papiera od 0,06 mm do 0,6mm. Po tom, ako došlo k prierazu bola papierová izolácia vymenená za novú a olej v nádobke bol premiešaný. Postup pri meraní bol u každej vzorky rovnaký, čím sa zabezpečila porovnateľnosť výsledkov. Pri meraní prierazného napätia neimpregnovaného papiera elektródový systém nebol ponorený do oleja.



Obr. 1. Elektrodový systém

III. VÝSLEDKY EXPERIMENTU

V nasledujúcej tabuľke sa nachádzajú namerané hodnoty prierného napätia pre neimpregnovaný papier. Hodnoty elektrickej priernej pevnosti boli získané výpočtom.

TABUĽKA I

Hodnoty prierného napätia a elektrickej priernej pevnosti v závislosti od hrúbky neimpregnovanej papierovej izolácie.

papierová izolácia (mm)	Up (kV)	Ep (kV/mm)
0,06	1,1	18,33
0,12	1,2	10
0,18	1,5	8,33
0,24	2,5	10,41
0,3	2,8	9,33
0,36	2,9	8,05
0,42	4,4	10,47
0,48	4,7	9,79
0,54	5,7	10,55
0,6	5,9	9,83

Prierné napätie neimpregnovaného papiera má so zväčšujúcou sa medzi elektrodovou vzdialenosťou rastúci charakter. Najväčšia hodnota $U_p = 5,9\text{kV}$ bola nameraná pri vzdialenosti elektrod $d=0,60\text{mm}$. Elektrická prierná pevnosť má klesajúci charakter.

V nasledujúcej tabuľke sa nachádzajú namerané hodnoty prierného napätia pre papier impregnovaný prírodným rastlinným repkovým olejom.

TABUĽKA II

Hodnoty prierného napätia a elektrickej priernej pevnosti v závislosti od hrúbky papierovej izolácie impregnovaného prírodným rastlinným repkovým olejom.

papierová izolácia (mm)	Up (kV)	Ep (kV/mm)
0,06	3,2	53,3
0,12	6,9	57,5
0,18	9,5	50,8
0,24	11,6	48,33
0,3	12,7	42,3
0,36	14,6	40,5
0,42	20	47,6
0,48	20,4	42,5
0,54	20,2	37,4
0,6	20	9,83

Prierné napätie papiera impregnovaného prírodným rastlinným olejom má so zväčšujúcou sa medzi elektrodovou vzdialenosťou rastúci charakter. Najväčšia hodnota $U_p = 20,4\text{kV}$ bola nameraná pri

vzdialenosti elektrod $d=0,48\text{mm}$. Pri vzdialenostiach $d= 0,54$ a $0,60$ mm bol zaznamenaný mierny pokles.

V nasledujúcej tabuľke sa nachádzajú namerané hodnoty prierného napätia a elektrickej pevnosti pre papier impregnovaný olejom MIDEL 7131.

TABUĽKA III

Hodnoty prierného napätia a elektrickej priernej pevnosti v závislosti od hrúbky papierovej izolácie impregnovaného olejom MIDEL 7131.

papierová izolácia (mm)	Up (kV)	Ep (kV/mm)
0,06	2,4	40
0,12	6,5	54,16
0,18	9	50
0,24	11,8	49,16
0,3	14	46,66
0,36	18,6	51,66
0,42	22,5	53,57
0,48	20,7	43,125
0,54	22,8	42,22
0,6	23,9	39,83

Prierné napätie papiera impregnovaného olejom MIDEL7131 má so zväčšujúcou sa medzi elektrodovou vzdialenosťou rastúci charakter. Najväčšia hodnota $U_p = 23,9\text{kV}$ bola nameraná pri vzdialenosti elektrod $d=0,60\text{mm}$.

V Tabuľke IV sa nachádzajú namerané hodnoty prierného napätia pre papier impregnovaný olejom ITO 100.

TABUĽKA IV

Hodnoty prierného napätia a elektrickej priernej pevnosti v závislosti od hrúbky papierovej izolácie impregnovaného olejom ITO 100

papierová izolácia (mm)	Up (kV)	Ep (kV/mm)
0,06	2,3	38,33
0,12	6,3	52,5
0,18	7,6	42,22
0,24	8,7	36,25
0,3	9,6	32
0,36	14,2	39,44
0,42	14,8	35,23
0,48	17,2	35,83
0,54	21,2	39,26
0,6	20,1	33,5

Prierné napätie papiera impregnovaného olejom ITO 100 má so zväčšujúcou sa medzi elektrodovou vzdialenosťou rastúci charakter. Najväčšia hodnota $U_p = 21,2\text{kV}$ bola nameraná pri vzdialenosti elektrod $d=0,54\text{mm}$.

V Tabuľke V sa nachádzajú namerané hodnoty prierného napätia pre papier impregnovaný olejom Nynas- Lyra X. Prierné napätie papiera impregnovaného olejom Lyra X má so zväčšujúcou sa medzi elektrodovou vzdialenosťou rastúci charakter. Najväčšia hodnota $U_p = 17\text{kV}$ bola nameraná pri vzdialenosti elektrod $d=0,60\text{mm}$.

TABULKA V

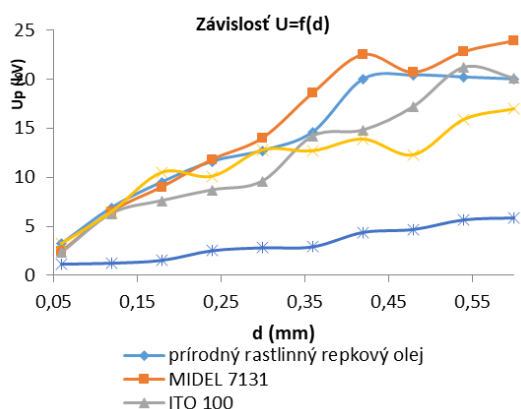
Hodnoty prieražného napätia a elektrickej prieražnej pevnosti v závislosti od hrúbky papierovej izolácie impregnovaného olejom Nynas- Lyra X

papierová izolácia (mm)	Up (kV)	Ep (kV/mm)
0,06	3,2	53,33
0,12	6,5	54,16
0,18	10,5	58,33
0,24	10,1	42,08
0,3	12,8	42,66
0,36	12,7	35,27
0,42	13,9	33,09
0,48	12,3	25,65
0,54	15,9	29,44
0,6	17	28,33

IV. ZÁVER A DISKUSIA

Na impregnovanie papiera boli použité minerálny, silikónový, syntetický a prírodný olej. Najlepšie výsledky preukazuje syntetický ester MIDEL 7131. Pre minerálny olej ITO 100 sa namerali podobné hodnoty prieražného napätia ako pre prírodný rastlinný repkový olej. Spomedzi všetkých vzoriek najhoršie výsledky má olej Nynas- Lyra X.

Na Obr. 2 sa nachádzajú grafické závislosti hodnôt prieražného napätia papierovej izolácie.



Obr. 2. Závislosť prieražného napätia U_p od medzi elektródovej vzdialenosti pre impregnovaný a neimpregnovaný papier

Na hodnotu prieražného napätia papierovej izolácie pozitívne vplýva impregnácia. Najlepšie výsledky preukazuje olej MIDEL 7131. Papier impregnovaný týmto olejom má štvornásobne väčšiu hodnotu prieražného napätia ako neimpregnovaný papier. Namerané hodnoty prieražného napätia pre papier impregnovaného prírodným rastlinným repkovým olejom sú podobné hodnotám nameraných pre olej ITO 100.

Skratky definujte pri prvom použití v texte, dokonca aj vtedy, keď už boli definované v abstrakte. Skratky, ako napr. IEEE, SI, MKS, CGS, js, ef, nemusia byť definované. Pokiaľ to nie je nevyhnutné, nepoužívajte skratky v nadpise.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol na základe podpory projektov: VEGA 2/0011/20, 1/0154/21 a na základe podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja na základe zmlúv č. APVV-18-0160 and APVV-22-0115.

LITERATÚRA

- [1] A. Munajad and C. Subroto, "Study on the Effects of Thermal Aging on Insulating Paper for High Voltage Transformer Composite with Natural Ester from Palm Oil Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)," *Energies*, vol. 10, no. 11. MDPI AG, p. 1857, Nov. 13, 2017. doi: 10.3390/en10111857.
- [2] M. Rafiq et al., "Use of vegetable oils as transformer oils – a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 308–324, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.032.
- [3] Ruijin Liao, Cheng Lv, Lijun Yang, Yiyi Zhang, Weiqiang Wu, Chao Tang, "The Insulation Properties of Oil-Impregnated Insulation Paper Reinforced with Nano-TiO₂", *Journal of Nanomaterials*, vol. 2013, Article ID 373959, 7 pages, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/373959>
- [4] Paul Jusner, Elisabeth Schwaiger, Antje Potthast, Thomas Rosenau, Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers – A review, *Carbohydrate Polymers*, Volume 252, 2021, 117196, ISSN 0144-8617, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117196>.
- [5] S. Abdi, A. M. Haddad, N. Harid, and A. Boubakeur, "Modelling the Effect of Thermal Aging on Transformer Oil Electrical Characteristics Using a Regression Approach," *Energies*, vol. 16, no. 1. MDPI AG, p. 381, Dec. 29, 2022. doi: 10.3390/en16010381.
- [6] Paul Jusner, Elisabeth Schwaiger, Antje Potthast, Thomas Rosenau, Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers – A review, *Carbohydrate Polymers*, Volume 252, 2021, 117196, ISSN 0144-8617, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117196>

ADRESY AUTOROV

Ján Zbojovský, Technická Univerzita v Košicach, Katedra elektroenergetiky, Másiarska 74, Košice, SK 04200, Slovenská Republika, jan.zbojovsky@tuke.sk