

Lukáš Lisoň, Irida Kolcunová, Samuel Bucko

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

## Vplyv spôsobu impregnácie na priernú pevnosť kombinovanej izolácie olej-papier

**Abstrakt.** Izolačný systém olej-papier sa používa s úspechom v elektrotechnických zariadeniach už desiatky rokov. Prevažná časť porúch elektrických zariadení je spojená práve s izolačným systémom. Tento článok je zameraný na meranie priernej pevnosti izolačného systému olej-papier a vplyvu spôsobu impregnácie na túto vlastnosť. Meranie bude realizované na papierovej izolácii impregnovanej minerálnymi olejmi a prírodnými esterami.

**Abstract.** Insulation of oil-paper is used with success in electric power equipment for many years. Most failures of electrical equipments are connected just with the insulation. Therefore, this article is focused on measurement breakdown voltage and electrical breakdown strength of insulation of oil-paper and influence of impregnation process on these properties. Mineral oil paper insulation and natural oil paper insulation will be measured. (Effect of impregnation method on the breakdown strength of the combined oil-paper insulation)

**Kľúčové slová:** impregnácia, olej-papier, prierné napätie, elektrická prierná pevnosť

**Keywords:** impregnation, oil-paper, breakdown voltage, electrical breakdown strength

### Úvod

Kombinovaný izolačný systém, olej-papier sa v elektrotechnickom priemysle používa už desiatky rokov. Najčastejšie sa s takýmto typom izolácie stretávame pri olejom plnených transformátoroch, vysokonapäťových káblach, priechodkách, kondenzátoroch a iných zariadeniach. Každá časť tohto kombinovaného izolačného systému má svoje dobré aj zlé vlastnosti. Papierová izolácia má dostatočnú mechanickú pevnosť a olej plní funkciu impregnačného a chladiaceho média. V olejom plnených transformátoroch je najčastejšie použitá izolácia tvorená elektroizolačným papierom a minerálnym olejom. Minerálny olej je s úspechom používaný v elektrotechnickom priemysle od konca 19-teho storočia. Našiel uplatnenie hlavne kvôli jeho dobrým elektroizolačným vlastnostiam, nízkej cene a širokej dostupnosti [1]. V poslednej dobe sú prírodné estery skúmané ako potenciálna náhrada minerálnych olejov, nakoľko sú takmer úplne biologicky odbúrateľné a ich bod vzplanutia je viac ako 300°C [2]. Prírodné estery majú trikrát vyššiu viskozitu ako minerálne oleje pri 20°C. To naznačuje, že je potrebná aj trikrát dlhšia doba na impregnáciu papierovej izolácie. Pre výrobcov transformátorov je táto skutočnosť z ekonomického aj časového hľadiska nežiaduca [3]. Táto skutočnosť vedie k nevyhnutnosti ďalšieho výskumu v tejto oblasti. Preto je tento článok venovaný výskumu papierovej izolácie impregnovanej prírodnými esterami a minerálnymi olejmi. Meraním prierného napätia bude sledovaný vplyv spôsobu impregnácie na elektroizolačné vlastnosti kombinovanej izolácie olej-papier.

### Prierné napätie a elektrická prierná pevnosť

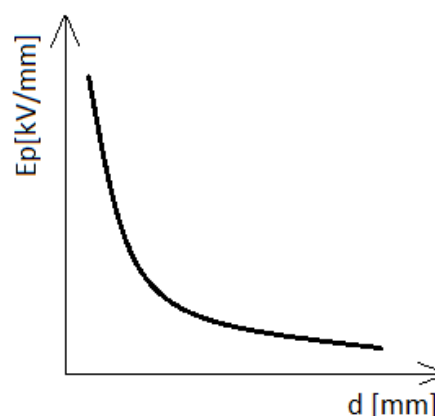
Prierné napätie predstavuje schopnosť izolačného materiálu odolávať elektrickému napätiu, ktoré na neho pôsobí. Je to hodnota elektrického napätia pri ktorej vodivosť vzrastie až na hodnotu vodivých materiálov. Vysoká hodnota prúdu pretekajúceho oblasťou prierazu spôsobuje zmeny chemických, mechanických a tepelných vlastností izolačného materiálu [4]. Elektrická pevnosť je najčastejšie používaný parameter pri stanovení kvality izolačného systému olej-papier [5]. Predstavuje hodnotu prierného napätia vztiahnutého na jednotku hrúbky. Pre

homogénne elektrické pole sa elektrická pevnosť vyjadruje vzťahom:

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

kde:  $E_p$  – elektrická pevnosť izolantu,  $U_p$  – prierné napätie,  $d$  – hrúbka izolačného materiálu.

Na hodnotu prierného napätia vplyva celý rad faktorov, ako napríklad: tvar elektrického poľa, čas pôsobenia, frekvencia, teplota, vlhkosť. Významnú rolu môže hrať hrúbka izolácie. Elektrická pevnosť so vzrastajúcou hrúbkou izolačného systému má klesajúci charakter, ako ukazuje obrázok 1.



Obr.1. Závislosť elektrickej prieraznej pevnosti od hrúbky izolačného materiálu

Nakoľko prieraz a preskok sú štatistický náhodné javy je potrebné merania elektrickej prieraznej pevnosti vykonávať opakovane a následne stanoviť priemernú hodnotu prierného napätia podľa vzťahu:

$$(2) \quad U_p = \frac{\sum_{i=1}^n U_{pi}}{n}$$

kde:  $n$  - počet meraní,  $U_{pi}$  - prierzné napätie pri  $i$  - tom meraní,  $U_p$  - priemerná hodnota prierzného napätia.

### Merané vzorky a príprava merania

U väčšiny elektrotechnických zariadení, ktoré majú izolačný systém tvorený kombinovanou izoláciou olej-papier, je použitých niekoľko vrstiev izolačného papiera, ktoré sa prekrývajú. Priestor medzi jednotlivými vrstvami je potom vyplnený izolačným olejom. Pri tomto meraní je preto použitých šesť vrstiev izolačného papiera ktoré sú impregnované minerálnym olejom a prírodným esterom. Týmto spôsobom je modelovaný vyššie spomínaný izolačný systém. Elektroizolačný papier hrúbky 0,06 mm bol impregnovaný nasledovnými izolačnými kvapalinami:

- rastlinný slnečnicový olej filtrovaný a chemicky upravovaný pre použitie v potravinárskom priemysle (RS)
- rastlinný repkový olej filtrovaný a chemicky upravovaný pre použitie v potravinárskom priemysle (RR)
- inhibovaný transformátorový olej ITO 100 vysoko rafinovaný minerálny olej s prísadou 2,6-di-terc-butyl-metylphenolu (MI)

Spôsob impregnácie papierovej izolácie a jej vplyv na prierznú pevnosť bol sledovaný na vzorkách prírodných esterov a výsledky týchto meraní boli porovnávané s vedecky dobre preskúmaným a široko používaným minerálnym olejom ITO 100.

Impregnácia papierovej izolácie prebiehala dvomi spôsobmi. Pri prvom spôsobe impregnácie boli vzorky papiera ponorené v izolačnom oleji a táto nádoba bola umiestnená vo výveve pomocou ktorej sa z izolačného papiera a kvapaliny odstránil vzduch. To znamená že impregnácia papiera prebiehala pod vákuom. Ďalej bude tento spôsob impregnácie označovaný ako "vákuová impregnácia". Pri druhom spôsobe impregnácie nebola použitá výveva. Vzorky papiera boli ponorené do izolačného oleja v uzavretej nádobe v laboratórnych podmienkach po dobu 24hodín. Ďalej bude tento spôsob impregnácie označovaný ako "impregnácia namáčaním". Pri oboch spôsoboch impregnácie boli použité vzorky izolačného papiera s rozmermi 5x5 cm.

### Postup merania

Na meranie prierzného napätia izolačného systému olej-papier bol použitý merací prístroj High-Voltage DTS-60D, ktorý je zobrazený na obrázku 2.

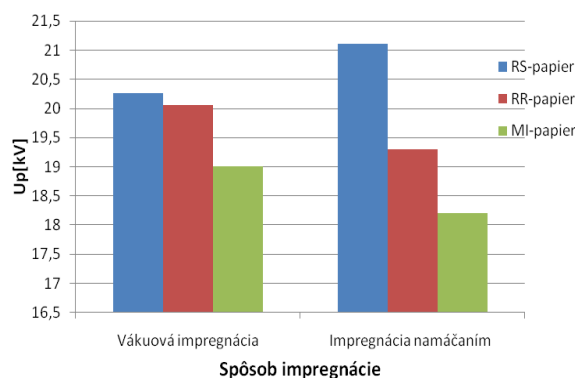


Obr.2. Prístroj na merania prierzného napätia

Vzorku izolačného papiera tvorilo šesť vrstiev papiera o celkovej hrúbke 0,36 mm. Izolačný olej bol do nádoby nalievajú tak, aby stekal po jednej z elektród pre elimináciu vzniku vzduchových bublín. Vzorka impregnovaného papiera bola umiestnená v nádobke medzi elektródami tak, že celý systém bol ponorený v oleji, aby sa zabránilo vzniku výbojov po povrchu papierovej izolácie. Po uplynutí päť minútového časového intervalu bolo vykonané prvé meranie. Napätie sa zvyšovalo od 0 kV do prierznu s krokom 2 kV/s. Po každom prierznu bola papierová izolácia vymenená za novú a olej v nádobke bol premiešaný. Pre každý druh impregnačného média bolo vykonaných päť meraní. Pred každou kompletnou výmenou vzorky s iným druhom impregnačného média bola nádobka dôkladne umytá a vysušená. Postup sa opakoval pre vzorky papierovej izolácie impregnovanej rastlinným slnečnicovým olejom (RS-papier), rastlinným repkovým olejom (RR-papier) a minerálnym olejom ITO 100 (MI-papier).

### Výsledky merania a diskusia

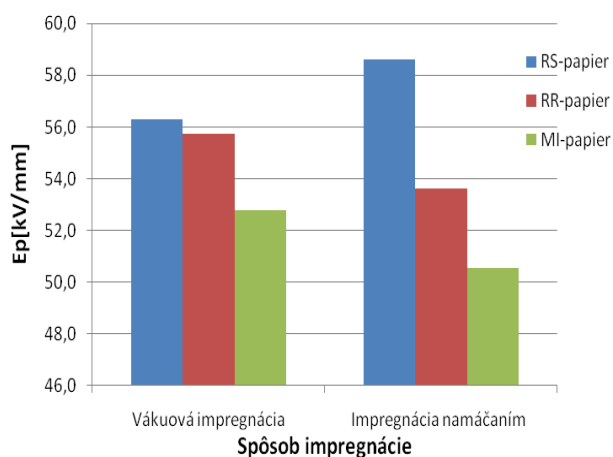
Porovnanie výsledkov merania prierzného napätia kombinovanej izolácie olej-papier pre rôzne typy izolačných olejov sú uvedené v grafickej závislosti na obrázku 3. Na tomto obrázku sú uvedené priemerné hodnoty prierzného napätia vypočítané podľa vzťahu (2).



Obr.3. Prierzné napätie izolačných systémov olej-papier v závislosti na spôsobe impregnácie .

Z výsledkov merania vyplýva, že kombinácia rastlinného slnečnicového oleja a papiera dosahuje najvyššie hodnoty prierzného napätia v oboch prípadoch impregnácie . Pri tomto type izolácie môžeme pozorovať neočakávaný výsledok, ktorý sa pri ostatných izolačných systémoch neprejavil. Hodnota prierzného napätia pri impregnácii namáčaním je o 0,84 kV vyššia ako pri vákuovej impregnácii. Najnižšie hodnoty prierzného napätia boli namerané pri izolácii tvorenej izolačným papierom a minerálnym olejom ITO 100. Prierzné napätie pri vákuovej impregnácii minerálnym olejom ITO 100 je o 1,26 kV nižšie ako u slnečnicového oleja RS a pri impregnácii namáčaním je tento rozdiel až na úrovni 2,9 kV. Izolačné systémy tvorené RR-papier a MI-papier, majú podobný charakter, to znamená že vyššie hodnoty prierzného napätia boli namerané pri vákuovej impregnácii. Komplexné výsledky pre  $U_p$  a  $E_p$  pre všetky merania sú uvedené v tabuľke 1.

Elektrická prierzná pevnosť sa vypočítala podľa vzťahu (1), kde za  $d$  bola dosadená hodnota 0,36 mm, čo predstavuje hrúbku papierovej izolácie tvorenej šiestimi vrstvami papiera impregnovaného izolačným olejom. Na obrázku 4 sú zobrazené výsledky elektrickej prierznej pevnosti pre jednotlivé izolačné systémy.



Obr.4. Elektrická prierezová pevnosť izolovaných systémov olej-papier v závislosti na spôsobe impregnácie .

Tabuľka 1. Namerané a vypočítané hodnoty  $E_p$  a  $U_p$

RS papier	Vákuová impreg.		Impregnácia namáč.	
	$U_p$ [kV]	$E_p$ [kV/mm]	$U_p$ [kV]	$E_p$ [kV/mm]
1	20,8	57,78	22	61,11
2	19,3	53,61	21,8	60,56
3	20,6	57,22	21,4	59,44
4	17,8	49,44	19,6	54,44
5	22,8	63,33	20,7	57,50
priemer	<b>20,26</b>	<b>56,28</b>	<b>21,1</b>	<b>58,61</b>
RR papier	Vákuová impreg.		Impregnácia namáč.	
	$U_p$ [kV]	$E_p$ [kV/mm]	$U_p$ [kV]	$E_p$ [kV/mm]
1	21	58,33	17,8	49,44
2	19	52,78	18	50,00
3	20,5	56,94	20,4	56,67
4	19,5	54,17	19,2	53,33
5	20,3	56,39	21,1	58,61
priemer	<b>20,06</b>	<b>55,72</b>	<b>19,3</b>	<b>53,61</b>
MI papier	Vákuová impreg.		Impregnácia namáč.	
	$U_p$ [kV]	$E_p$ [kV/mm]	$U_p$ [kV]	$E_p$ [kV/mm]
1	18,9	52,50	18	50,00
2	19	52,78	18	50,00
3	19,2	53,33	18,9	52,50
4	19,4	53,89	17,9	49,72
5	18,5	51,39	18,2	50,56
priemer	<b>19</b>	<b>52,78</b>	<b>18,2</b>	<b>50,56</b>

Výsledky elektrickej priereznej pevnosti odzrkadľujú trend ako pri meraní prierezného napätia. Rozdiel medzi elektrickou pevnosťou pre RS-papier a MI-papier je 3,5 kV/mm pri vákuovej impregnácii a 8,5 kV/mm pri impregnácii namáčaním. Aj izolačný systém RR-papier dosahuje vyššie hodnoty  $E_p$  ako MI-papier a to o 2,94 kV/mm pre vákuovú impregnáciu a o 3,06 kV/mm pre impregnáciu namáčaním.

## Záver

Cieľom predkladaného článku bolo preskúmať vplyv spôsobu impregnácie papiera na elektrickú priereznú pevnosť kombinovanej izolácie olej-papier. Porovnávané boli dva druhy prírodných esterov s minerálnym olejom. Z výsledkov merania môže konštatovať nasledujúce závery:

- $E_p$  a  $U_p$  dosahujú vyššie hodnoty pri papierovej izolácii impregnovanej prírodnými esterami ako pri impregnácii minerálnym olejom,
- lepší vplyv na elektrickú priereznú pevnosť v prípade rastlinného repkového a minerálneho oleja ITO 100 vykazuje vákuová impregnácia,
- pri snečnicovom oleji sú vyššie hodnoty  $U_p$  a  $E_p$  pri impregnácii namáčaním
- výsledky  $E_p$  a  $U_p$  pri jednotlivých spôsoboch impregnácie nie sú natoľko rozdielne, aby sa v laboratórnych podmienkach nemohol uplatňovať jeden aj druhý spôsob impregnácie papierovej izolácie.

Z výsledkov experimentu vyplýva, že impregnácia papierovej izolácie prírodnými esterami dokáže konkurovať impregnácii minerálnym olejom z pohľadu prierezného napätia a elektrickej priereznej pevnosti. Ďalší výskum v tejto oblasti by mal byť orientovaný na vplyv teploty na hodnoty elektrickej priereznej pevnosti kombinovanej izolácie olej-papier.

## Literatúra

- [1] Dai, J., Wang, Z.D.: A Comparison of the Impregnation of Cellulose Insulation by Ester and Mineral oil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 2; April 2008.p. 374-380.
- [2] Li, J, Grybowski, S, Sun, Y and Chen, Y: Dielectric properties of rapeseed oil paper insulation. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.2007.p.500-503
- [3] Dai, J., Wang, Z.D.,Deyr, P.,Darwin, A.W.,James,I.,: Investigation of the impregnation of cellulosic insulations by ester fluids. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.2007 p.588-591.
- [4] Marci, M.,Kolcunová,I.,Kurimský,J.: Dielectric Properties of Natural Esters. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on. 8-11 May 2011.p1-4. ISBN 978-1-4244-8779-0.
- [5] Mentlík, V., Pihera, J., Podolský,R a kol.: Diagnostika elektrických zařízení.Praha ,2008 ISBN 978-80-73009232-9.



Táto práca bola podporovaná Agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky pre štrukturálne fondy EÚ na základe projektu Vývoj unikátneho nízkoenergetického statického zdroja pre elektrosystémy (číslo projektu: 26220220029, prioritná os 2 Podpora výskumu a vývoja)

**Autori:** Lukáš Lisoň, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [lukas.lison@tuke.sk](mailto:lukas.lison@tuke.sk)  
 Irida Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [irida.kolcunova@tuke.sk](mailto:irida.kolcunova@tuke.sk)  
 Samuel Bucko, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [samuel.bucko@tuke.sk](mailto:samuel.bucko@tuke.sk)