

Emil Jahoda, Jozef Kúdelčík

Katedra fyziky, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita v Žiline

## Štúdium povrchových výbojov na rozhraní izolácie s vzduchom

**Abstrakt.** Pôsobenie povrchových čiastočných výbojov v čase spôsobuje degradáciu elektrickej izolácie. Analýza ich parametrov, náboj, početnosť a fázové rozloženie bola uskutočnená v zapojení hrot-valec umiestnených na rôznych izolačných materiáloch. Bolo pozorované charakteristické rozloženie povrchových čiastočných výbojov v oblasti medzi nulou a maximom aplikovaného napätia a tiež čiastočne pred prechodom cez nulu z dôvodu prítomnosti povrchového náboja. Z meraní pre rôzne typy izolačných materiálov a rôznej vlhkosti transformátorovej lepenky vyplýva, že povrchové čiastočné výboje sú v značnej miere ovplyvnené ich povrchovou vodivosťou. Pri vzdalovaní VN hrotu od povrchu izolácie boli registrované záporné korónové výboje.

**Kľúčové slová:** čiastočný výboj; vysoké napätie; náboj; izolačné materiály.

**Abstract.** Surface partial discharges may degrade the electrical insulation in time. Analysis of their parameters, charge and phase distribution in a needle-cylinder electrode configuration at various insulation materials were done. The surface PDs were observed between the zero cross and the peak of an applied voltage and also before the zero cross due to the surface charges. The measurements on the different types of insulating materials and on transformer pressboard with various humidity resulted, that the surface discharges are influenced by the surface conductivity of material. The negative corona discharge was observed when the distance between the needle tip and the surface insulation increased.

**Keywords:** partial discharge, high voltage, charge, insulation materials.

### Úvod

Elektrická prenosová sústava pracuje s vysokým napätím z dôvodu minimalizácie strát. Pre bezporuchovú činnosť a prítomnosť vysokého napätia je nevyhnutná aj kvalitná izolácia. S cieľom udržať daný systém v správnom prevádzkovom stave je nevyhnutné, aby nebola poškodená jej izolácia. Všeobecne platí, že existencia defektov a miestne zvyšovanie elektrického napätia v izolácii alebo na povrchu izolácie vedie k vzniku čiastočných výbojov (CV). Výskyt čiastočných výbojov v izolácii zhoršuje jej parametre a tiež narastajú energetické straty [1, 2].

S cieľom zistiť stav izolácie a interpretovať proces starnutia, je dôležité pochopiť čiastočné výboje a ich koreláciu s fyzikálnymi procesmi na pozadí. Vzhľadom na zložitosť CV, rovnako ako faktory, ktoré môžu mať vplyv na ich vlastnosti, výskum zameraný na štúdium CV stále prebieha. Meraniam čiastočných výbojov pomocou základnej konfigurácie elektród pod vysokým napätím sa venuje veľa prác [3, 4, 5]. Podstata merania je založená na zázname pozorovania CV v závislosti na fáze aplikovaného napätia. Z tohto fázovo-nábojového rozloženia,  $\phi - q$  kde  $\phi$  je fázový uhol výskytu CV a  $q$  je veľkosť jeho náboja, sa dajú potom stanoviť základné charakteristiky daného typu CV. Využitím týchto znalostí a analýz sa dá potom využiť v online alebo offline diagnostike energetického zariadenia pri klasifikácii CV.

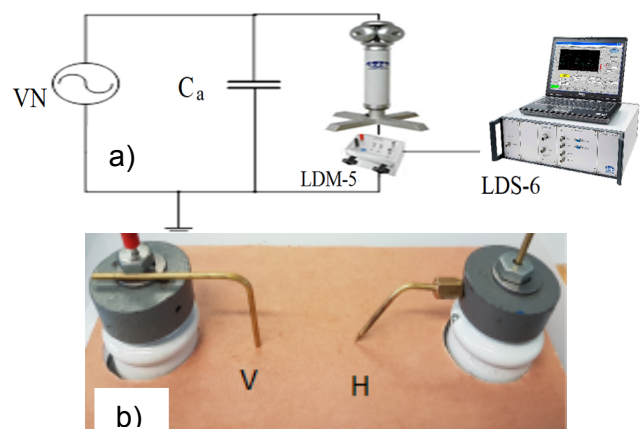
Viacero prác študuje povrchové výboje na povrchu olejovej lepenky a rozvoj bielych značiek [6, 7, 8]. Biele značky hrajú dôležitú úlohu vo výskyte prierezov preostávajúcej elektródy. Ich výskyt dáva informácie o vysychavom procese, kde vplyvom povrchových výbojov dochádza k poklesu vlhkosti z lepenky. Existencia povrchových výbojov spočiatku spôsobuje poškodenie lepenky, kým nie sú vytvorené karbonizované cesty v blízkosti VN elektródy, ktoré sa rozvíjajú so smerom k uzemňovacej elektróde. Prierez je výsledkom procesu dlhodobej degradácie, ktorá je ovplyvnená taktiež stavom povrchu izolácie a oleja.

V článku sú prezentované a analyzované výsledky meraní povrchových výbojov na rôznych typoch materiáloch pomocou fázovo-nábojového rozloženia CV. Tieto analýzy boli použité pre interpretáciu mechanizmu CV a objasnenia fyzikálnych javov pri ich vzniku.

### Experiment

Elektrická detekcia čiastočných výbojov je jedna z najčastejšie používaných metód pre vysoko napäťové zariadenia. Zameriava sa na výskyt prúdových pulzov, ktoré

sú generované lokálnymi výbojmi. V našom experimente bolo použité galvanické prepojenie meracej impedancie LMD-5 (šírka pásma 20 MHz, max. prúd 5 A) so študovaným objektom. Táto metóda patrí ku globálnym metódam merania CV a je jedna z najviac sofistikovaných metód, ktorá je navrhnutá tak, aby sledovala stav izolačného systému vo VN systémoch. V tomto zapojení môžeme priamo snímať prúdové impulzy naložené na napájacom napätí. Väzobný kondenzátor poskytuje uzavretú cestu pre prúdové pulzy a je zapojený v sérii s meracou impedanciou a paralelne pripojený s testovaným objektom prezentovaným ako kapacita  $C_a$  (Obr. 1a)). CV pulzy sú zosilnené a analyzované pomocou detektora CV - LDS-6. Systém meria a znázorňuje CV pulzy alebo ich početnosť v závislosti od fázy aplikovaného napätia. Výhodou tohto obvodu je schopnosť merať uzemnené objekty a preto je ho vhodné používať, ak nie je možné pripojiť výstup na zem, alebo v prípade vysokých kapacít meracích objektov. Pred každým novým meraním bola spravená kalibrácia pomocou LDC-5. Meranie sprevádzal šum, ktorého maximálna hodnota nepresahovala 8 pC pri aplikovanom napätí 15 kV, bez zapojenia elektród. Táto prahová hodnota bola potom prednastavená v snímacom programe na odstránenie daného šumu.



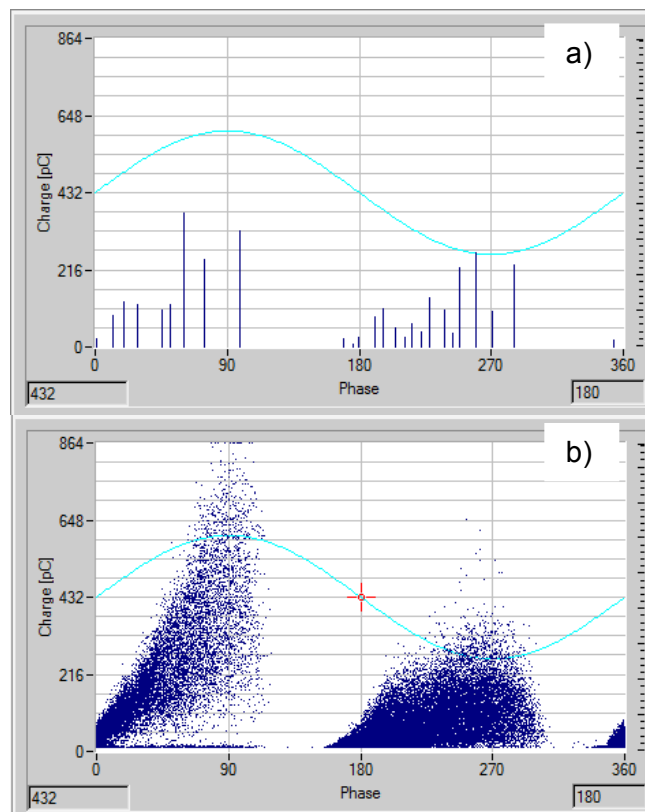
Obr. 1 (a) Elektrická schéma zapojenia pre meranie čiastočných výbojov (HV AC zdroj,  $C_a$  – merací objekt reprezentovaný pomocou kapacity, väzobná kapacita, LDM-5 – meracia impedancia, PD detektor – LDS-6. (b) Fotka usporiadania elektród (V – valec, H – hrot).

Fotka zapojenia na meranie povrchových čiastočných výbojov vo vzduchu je znázornená na Obr.1b). Zapojenie

elektrod v usporiadaní hrot – rovina (valec) je často používaný experimentálny spôsob generovania povrchových výbojov na rôznych materiálových rozhraniach [6, 8, 9, 10, 11]. Zabrúsená elektróda, zdroj výboja, s hrotom o polomere krivosti 0,1 mm bola umiestnená šikmo na rozhranie izolačného materiálu vo vzdialenosti 68 mm od uzemňovacej elektródy - C, umiestnenej tiež na povrchu materiálu. Týmto spôsobom je zaistená veľká tangenciálna zložka elektrického poľa na povrchu izolácie a minimalizuje sa vertikálna zložka poľa. Toto zapojenie generuje povrchové výboje a redukuje možnosť prerazu materiálu ako v prípade hrotovo-rovinného usporiadania elektród. Povrchové výboje boli generované na transformátorovom papieri a lepenke typu PSP 3055 [12] hrúbky 0,1 mm a 1 mm a ďalších materiáloch.

### Experimentálne výsledky a diskusia

Na Obr. 2a) je znázornená jedna pulzná sekvencia povrchových výbojov v kladnej a zápornej polperióde. Meranie bolo realizované pri aplikovanom napätí 5 kV na hrot elektródy umiestnenej spolu s valcom na rozhraní lepenka-vzduch. V danej reprezentovanej časovej vzorke pozorujeme, že k výbojom došlo medzi nulou a maximom aplikovaného napätia. Počet prúdových pulzov v kladnej polperióde bol menší (okolo 9) ako v zápornej (okolo 15). Na Obr. 2b) je znázornený fázovo-nábojový diagram počas 30 s merania povrchových výbojov pri tých istých podmienkach. Každý bod reprezentuje jednotlivý CV, pričom jeho pozícia odpovedá fázovému uhlu pri ktorom vznikol a veľkosti jeho náboja. Z obrázku je zrejmé, že veľkosť pulzov v kladnej polperióde je vyššia ako v zápornej.



Obr. 2 Typické  $\phi$ -q-n vzory (a) a pulzné sekvencie (b) povrchových výbojov pre rozhranie vzduch-lepenka so 68mm vzdialenosťou elektród, pri aplikácii 7 kV napätia na hrot elektródy

Z Obr. 2 je viditeľné, že povrchový výboj na rozhraní lepenka-vzduch vzniká hlavne v oblasti nulového

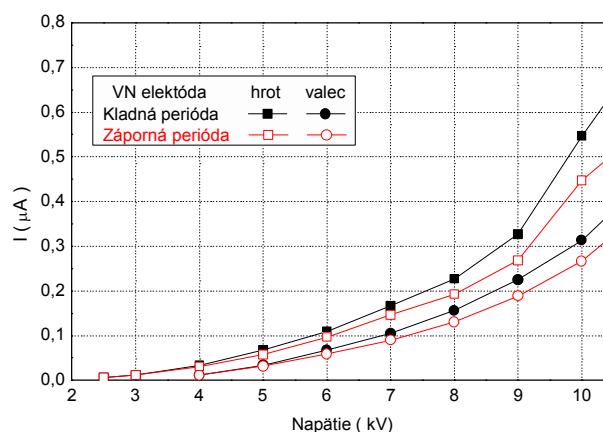
aplikovaného napätia a je rozložený až k jeho vrcholu. Podobné fázové rozloženie CV bolo tiež pozorované v ďalších prácach [2, 3, 7, 15, 16]. Z obrázku taktiež vyplýva, že ku kladným výbojom dochádza už pri aplikovaní záporného napätia ( $350^\circ - 360^\circ$ ) a k záporným výbojom zase pri aplikovaní kladného napätia ( $170^\circ - 180^\circ$ ). Toto je hlavný rozdiel oproti korónovým výbojom, kde sú zvyčajne CV pulzy situované okolo jedného maxima aplikovaného napätia [13]. Veľkosť nábojov a frekvencia opakovania sú pre povrchové výboje tiež menšie ako pre korónové výboje. Korónové výboje sú od niekoľkých pC až po 50 pC a početnosť CV pulzov je vyššia než 300 za cyklus, kým u povrchových PD sú tieto hodnoty opačné [3, 13].

Tabuľka 1. Stredná hodnota náboja a počtu CV v kladnej (K) a zápornej (Z) polperióde pre rozhranie lepenka-vzduch, pri vzdialenosti elektród 68 mm a priložení napätia na hrot.

Napätie [kV]	Stredná hodnota $Q_K$ [pC]	Stredná hodnota $Q_Z$ [pC]	$N_p$ /cyklus	$N_n$ /cyklus
3	52	43	2	3
5	133	66	5	9
7	156	84	11	17
9	239	96	14	28
11	65	47	114	121

Stredné hodnoty veľkosti náboja a počtu CV pulzov pre danú pol-periódou pri daných experimentálnych parametroch (Obr. 2), sú uvedené v Tabuľke 1. Počiatočné napätie vzniku CV bolo  $U_i = 2.4$  kV. Z Tabuľky 1. je evidentné, že stredná hodnota veľkosti náboja kladných výbojov je vyššia ako pre záporne výboje. V prípade ich počtu je situácia opačná. Počet a stredná hodnota náboja rastie s napätím. Z hodnôt je vidieť, že stredný náboj rapídne klesol a počet pulzov za cyklus zas narástol pre napätie 11 kV.

Pri aplikovaní striedavého napätia na elektródu valcovitého tvaru (C-elektroda, Obr. 1b)) bolo počiatočné napätie vzniku CV 2.8 kV. Z meraní povrchových výbojov pomocou pulznej sekvencie vyplýva, že výskyt výbojov bol podobný ako pri aplikovaní napätia na hrot (Obr. 3).

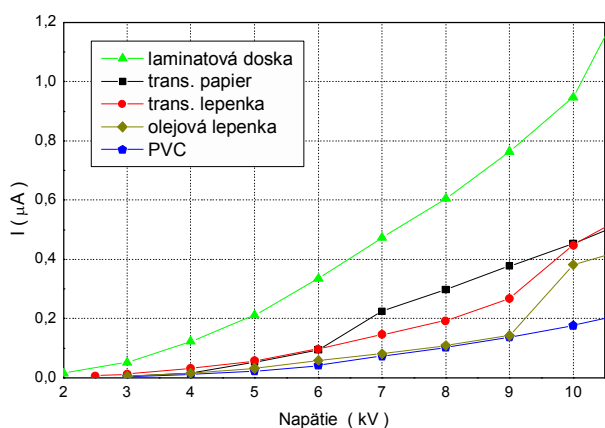


Obr. 3 Priemerná hodnota pozitívneho a negatívneho výbojového prúdu ako funkcia aplikovaného napätia pre rozhranie vzduch-lepenka pri vzdialenosti elektród 68 mm a priložením napätia na hrot elektródy a valec.

Obr. 3 znázorňuje priemernú hodnotu výbojového prúdu ( $I = Q N f$ ) ako funkciu aplikovaného napätia zvlášť pre kladnú a zápornú polperiódu pre dva typy VN elektród umiestnených na povrchu lepenky. Zo získaných výsledkov je vidieť, že prúd rastie s hodnotou aplikovaného napätia. Prúd v kladnej časti je väčší ako v zápornej. Pri priložení napätia na hrot elektródy je prúd väčší než pri valci. Tento

efekt je spôsobený väčším elektrickým poľom na hrote elektródy než na valci, hrot mal priemer 0.1 mm a valec 4 mm. S rastúcim polomerom zakrivenia VN elektródy stredná veľkosť náboja CV a počet ich pulzov klesá. Zmenšovanie vzdialenosti medzi elektródami spôsobuje nárast veľkosti a početnosti CV, čo je spôsobené nárastom tangenciálnej zložky elektrického poľa.

Odvolávajúc sa na predchádzajúce výsledky, počet CV vzniknutých v kladnej časti aplikovaného napätia bol menší ako pre zápornú polperiódu. Tento jav je dôsledkom generácie väčšieho počtu elektrónov z katódy, elektródy so záporným napätím, v dôsledku čoho je tu potom väčšia pravdepodobnosť vzniku viacerých elektrónových lavín. Stredná hodnota veľkosti náboja CV v kladnej časti je vyššia ako v zápornej časti aplikovaného napätia, čo je spôsobené s ich menším počtom. Fázové rozloženia nábojov a početnosti povrchových výbojov v kladnej a v zápornej oblasti aplikovaného napätia nie sú symetrické, pretože elektrické pole na povrchu materiálu počas kladného a záporného cyklu tiež nie je symetrické. Toto je spôsobené malou pohyblivosťou nábojov na povrchu izolácie, ktoré majú následne vplyv na rozloženie elektrického poľa.

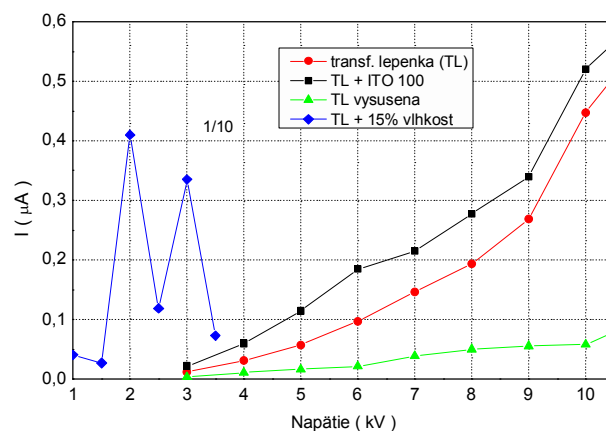


Obr. 4 Stredná hodnota záporného výbojového prúdu ako funkcia aplikovaného napätia pre rôzne izolačné povrchy pri 68 mm vzdialenosťou elektród a pôsobením VN na hrot elektródy.

Na Obr. 4 je znázornená závislosť priemernej hodnoty záporného výbojového prúdu ako funkcia aplikovaného napätia. VN hrot bol umiestnený na rôznych povrchoch izolačných materiálov: laminátová doska ( $U_i = 1.8$  kV), tenký transformátorový papier (2,8 kV), lepenka (2,4 kV), olejová lepenka (2,8 kV) a PVC (2,7 kV). Z meraní je vidieť, že pre všetky izolačné materiály prúd rastie s napätím. Z fázového rozloženia CV vyšlo, že taktiež pre tieto materiály veľkosť kladného čiastkového výboja bola väčšia ako záporného. Analýza pomocou pulznej sekvencie CV ukázala, že CV vznikali v rozmedzí  $350^\circ - 0^\circ - 100^\circ$  a  $170^\circ - 290^\circ$  aplikovaného napätia. Rozdielne hodnoty v nameraných hodnotách prúdov sú spôsobené rôznou povrchovou vodivosťou izolačných materiálov, životnosťou a distribúciou povrchových nábojov.

V ďalšej časti výskumu sme študovali vplyv zmeny vodivosti transformátorovej lepenky na parametre CV (Obr. 5). Ako porovnávajúca vzorka bola novo zakúpená transformátorová lepenka priamo od výrobcu nasiaknutá vzdušnou vlhkosťou s hodnotou okolo 1%. Lepenka po vysušení v laboratórnej peci,  $80^\circ\text{C}$  počas 5 h, vykazuje výrazne nižšiu výbojovú činnosť a vyrastá aj počiatkové napätie na 3.7 kV. Pri nanosení transformátorového oleja ITO 100 na vysušenú vzorku (2,9 kV) pozorujeme mierne vyššiu výbojovú činnosť ako pre novú lepenku. Toto je

dôsledkom väčšieho objemu oleja na lepenke čo zvyšuje vodivosť nasiaknutého materiálu o 1 rád oproti novej lepenke. V prípade navlhčenia lepenky vodou (vlhkosť – 15%) nastáva výrazný nárast CV o 1 rád a pokles počiatkového napätia na 0,9 kV. Tento viditeľný efekt je spôsobený nárastom povrchovej vodivosti o 2-3 rády dôsledkom vysokého obsahu vody.



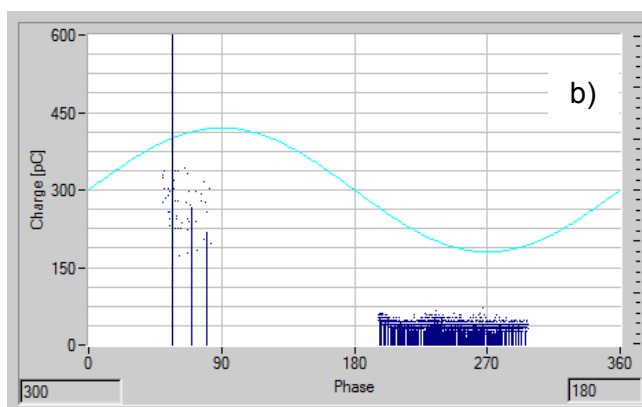
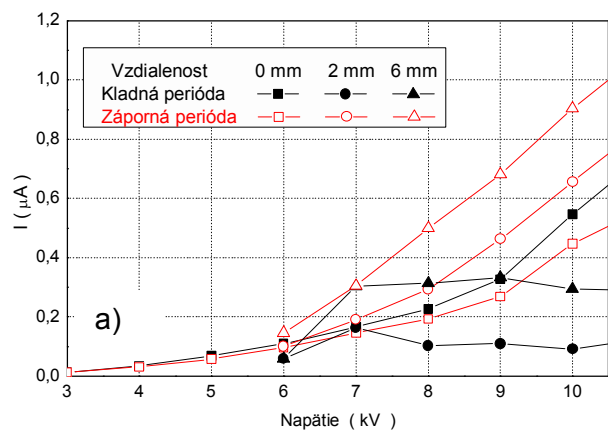
Obr. 5. Stredná hodnota negatívneho výbojového prúdu ako funkcia aplikovaného napätia pre rôzne upravené povrchy transformátorovej lepenky so 68mm vzdialenosťou elektród a pôsobením HV na hrot elektródy.

Povrchové poškodenie izolácie je výsledkom dlhodobiejšieho pôsobenia povrchových výbojov na jej rozhraní so vzduchom. Pozdĺž izolácie v oblasti hrotu elektródy je veľká tangenciálna zložka elektrického poľa, ktorá spôsobuje polarizáciu jej povrchu a tým aj vzniku povrchového náboja. So zvyšovaním napätia intenzita elektrického poľa presiahne preraznú pevnosť vzduchu a nastáva ionizácia vzduchu. Proces ionizácie a rozvoj elektrónových lavín nastáva v blízkej oblasti povrchu izolácie a tak sú silne ovplyvnené povrchovým nábojom. Každá elektrónová lavína alebo povrchový CV spôsobuje elektrické zmeny povrchu izolácie, povrchovej vodivosti a vytvára povrchové náboje čo ovplyvňuje ďalšie CV. Zrejmý vplyv povrchového náboja je fázový posun vzniku výbojov napravo od maxima napätia a pri dostatočnom napätí vzniká aj v opačnej fáze (Obr.2). Pri zvýšenom napätí počet elektrónov vzniknutých ionizačným procesom vzrastá a elektrónová lavína môže rásť ďalej pozdĺž povrchu materiálu [2, 14]. CV teda vznikajú na povrchu izolácie a šíria sa po nej z dôvodu energetickej výhodnosti. Elektróny sú urýchľované pozdĺž povrchu v smere tangenciálnej zložky elektrického poľa a tak rýchlo získavajú energiu. Energia elektrónov počas povrchového výboja dosahuje eV a tá je dostatočná pre narušenie molekulárnych väzieb materiálu a uvoľnenie jeho atómov a molekúl. Jedným z produktov takto uvoľnených zložiek je aj uhlík, ktorý sa spätne čiastočne usádza na povrch izolácie. Tento usadený uhlík potom vytvára vodivú cestu po ktorej sa výboj dostáva ďalej až nakoniec premostí celú medzi-elektrodovú vzdialenosť a vzniká preraž.

Posledný typ merania bol zameraný na zmenu parametrov a obrazcov CV pri vzdalovaní VN hrotu od povrchu lepenky. Výsledky pre strednú hodnotu výbojového prúdu ako funkcia aplikovaného napätia sú vynesené na Obr. 6a). Ako už bolo ukázané v prípade hrotu umiestneného na povrchu lepenky, kladné a záporné CV sa len mierne líšia. S nárastom vzdialenosti hrotu od povrchu materiálu narastá počiatkové napätie CV a dochádza tiež k zvýšeniu hodnoty kladného náboja vzhľadom na záporné CV. V prípade početnosti pulzov pozorujeme opačný efekt. Analýza



pomocou pulzej sekvencie CV ukázala, že kladné CV sa stále objavujú v oblasti okolo nuly aplikovaného napätia a boli rozložené smerom k jeho vrcholu (Obr. 6b)). Pri vzdalovaní hrotu od povrchu vznikajú podmienky na vznik korónového výboja, čo sa prejavuje nárastom početnosti pulzov v zápornom cykle. Záporné CV sú sústredené naľavo od maxima aplikovaného napätia, čo je dôsledkom blízkosti povrchu lepenky a povrchového náboja. Nárast vzdialenosti VN hrotu od povrchu izolácie sa prejavuje zvýšením zápornej zložky priemernej hodnoty výbojového prúdu.



Obr. 6 (a) Stredný kladný a záporný výbojový prúd ako funkcia aplikovaného napätia (b) Pulzná sekvencia povrchových výbojov pri 2 mm vertikálnej vzdialenosti elektródy od povrchu lepenky. Horizontálna vzdialenosť elektród je 86 mm a napätie 8 kV je privedené na hrot elektródy

## Záver

Táto práca študovala parametre povrchových čiastkových výbojov na rozhraní transformátorová lepenka-vzduch. Z analyzovaných dát je možné vidieť, že CV vznikajú medzi nulou a kladným, záporným maximom priloženého napätia. Stredná hodnota náboja povrchových čiastkových výbojov v zápornej polperióde bola menšia, no ich početnosť zase väčšia ako v kladnej polperióde. Parametre výbojov sú vo výraznej miere závislé od povrchovej vodivosti izolačného materiálu. So vzdalovaním hrotu od izolácie narastá výbojová činnosť v zápornej polperióde čo súvisí so vznikom korónových výbojov.

## Literatúra

- [1] Y. Suzuoki, Y. Kodani, F. Komori, T. Kato: Relation between Concentration of Partial Discharge and Surface Degradation and Breakdown, 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, pp. 404-407.
- [2] H. Ilias, T.S. Yuan, H.A. Bakar, H. Mokhlis, G. Chen, P.L. Lewin: Partial Discharge Patterns in High Voltage Insulation, 2012 IEEE International Conference on Power and Energy

(PECon), 2-5 December 2012, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, pp. 750-755.

- [3] Suwarno, T. Mizutani: Pulse-Sequence Analysis of Discharges in Air, Liquid and Solid Insulating Materials, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 1, No. 4, pp. 528-533, 2006.
- [4] O. Altay, O. Kalenderli, A. Merev, S. Dedeoglu, K. Gulnihar: Preliminary partial discharge measurements with a computer aided partial discharge detection system, International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO, IEEE, I-345-348, 5-8 Nov, 2009.
- [5] Suwarno, H. Sutikno: Measurement, Modeling and Computer Simulation of Partial Discharges in Natural Liquid Insulation for High Voltage Transformer, Recent Researches in Computational Techniques, Non-Linear Systems and Control, Iasi, Romania, July 1-3, 2011, pp. 160-165.
- [6] P.M. Mitchinson, P.L. Lewin, B.D. Strawbridge, P. Jarman: Tracking and surface discharge at the oil-pressboard interface, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 26, No. 2, pp. 35-41, March/April 2010.
- [7] Y. Cheng, E. Gockenbach, Ch. Eichler, Ch. Li: The Partial Discharge Phenomena on the Surface of Oil Impregnated Paper With Parallel Electric Field, 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [8] H. Zainuddin, P.M. Mitchinson, P.L. Lewin: Investigation on the Surface Discharge Phenomenon at the Oil-pressboard Interface, 2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids.
- [9] V. Sokolov, Z. Berler, V. Rashkes: Effective methods of assessment of insulation conditions in power transformers: A view based on practical experience, Proceedings of Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp. 659 - 667, 1999.
- [10] H. Gui, Z. De-Yi: Surface discharge characteristics of impregnated pressboard under AC voltages, IEEE Conference Publication Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Vol. 1, pp. 313-316, 1991.
- [11] P. Výrostko, J. Kurimský: Variácia prierazného napätia polypropylénovej fólie počas urýchleného starnutia, Starnutie elektroizolačných systémov, roč. 10, č.1, 10-12, 2015.
- [12] [http://www.dix.sk/presspany\\_06.php](http://www.dix.sk/presspany_06.php)
- [13] L. Varačka, J. Kúdelčík: Partial discharge in air and transformer oil, In: TRANSCOM 2015 [CD-ROM]: 11-th European conference of young researchers and scientists: Žilina, 22.-24.6 2015, Slovak Republic, 74-78.
- [14] G.J. Paoletti, A. Golubev: Partial discharge theory and technologies related to medium-voltage electrical equipment, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 1, pp. 90-103, January 2001.
- [15] P. Duda, I. Kolcunová: Modelovanie povrchových čiastkových výbojov, Starnutie elektroizolačných systémov, 11(1) 2016, 29-32
- [16] J. Kurimský, I. Kolcunová: Modelovanie čiastkových výbojov v izolačnom systéme transformátorov, Starnutie elektroizolačných systémov, 3 2007, 25-28

## Podakovanie

Táto práca bola podporená projektom VEGA 2/0045/13 a R&D operačným programom Centrum excelentnosti výkonových elektronických systémov a materiálov pre ich komponenty, OPVaV-2008/2.1/01-SORO, ITMS: 26210120021, spolufinancovaný zo zdrojov EÚ a Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## Autori

Emil Jahoda, Katedra fyziky, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, [emil.jahoda1990@gmail.com](mailto:emil.jahoda1990@gmail.com)

Jozef Kúdelčík, Katedra fyziky, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, [kudelcik@fyzika.uniza.sk](mailto:kudelcik@fyzika.uniza.sk)