

Iraida kolcunová, Bystrík Dolník, Jaroslav Briančin, Martin Fabián

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach
Ústav geotechniky, Slovenská akadémia vied, Košice

Meranie zvodových prúdov na modeli tanierového izolátora

Abstrakt. Izolátor reprezentuje dôležitý prvok prenosovej sústavy, ktorý elektricky oddeľuje a mechanicky spája dva body s rôznym potenciálom. Článok pojednáva o meraní povrchového zvodového prúdu na modeli tanierového izolátora za súčasného simulovania znečistenia povrchu použitím vodivej elektrolytickej vrstvy s rôznou vodivosťou. Experimentálne merania na fyzikálnom modeli poukázali na tú skutočnosť, že najviac vhodná frekvencia testovacieho napätia sínusového tvaru je 10 kHz. Bolo tiež dokázané, že s narastajúcim stupňom znečistenia narastá aj povrchový zvodový prúd na vlhkom povrchu. Monitorovanie unikajúceho prúdu pozdĺž povrchu vonkajšej izolácie možno použiť ako indikátor znečistenia vonkajšej izolácie.

Abstract. The isolator is one of the important elements of the transmission system that separates electrically and mechanically connects two points with different potentials. This paper is focused on the measurement of surface leakage current on the insulator model. To simulate environmental pollution, a conductive electrolyte layer with different conductivity was used. Experimental measurements on the physical model point to the fact that the most suitable frequency of the sine wave test voltage is 10 kHz. It has also been shown that surface leakage current is also increasing as the degree of pollution increases, under wet conditions. Monitoring the leakage current along the surface of the external insulation may be used as an indicator of contamination outside of the insulation. (**Measurement of leakage currents on the insulator model**).

Kľúčové slová: izolácia, znečistenie, zvodový prúd, tanierový izolátor.

Keywords: insulation, pollution, leakage current, insulator.

Úvod

Izolátor je jedným z dôležitých prvkov prenosovej sústavy, ktorý elektricky oddeľuje a mechanicky spája dva body s rôznym potenciálom. Počas prevádzky je permanentne vystavený vplyvu poveternostných podmienok. V posledných rokoch, spolu s rýchlym vývojom priemyslu a hospodárstva, kvalita ovzdušia sa zhoršuje. V dôsledku znečistenia povrchu vysokonapäťových izolátorov dochádza k preskokom po povrchu, čo môže spôsobiť rozsiahle výpadky dodávky elektrickej energie. To je aj dôvod, že v mnohých krajinách sa robí veľa štúdií o výskyte preskokov po povrchu znečistených izolátorov. Experimenty akumulácie znečistenia na povrchu prevádzkovaných izolátorov poukázali na tú skutočnosť, že vrstva znečistenia je vždy nerovnomerná. Nerovnomernosť navlhčenia horného a spodného povrchu izolátora ovplyvňuje hodnotu preskoko-vého napätia [1].

Počas prevádzky povrch izolátora sa stáva znečistený vrstvou prachu. Keď povrch izolátora je suchý, znečistenie je nevodivé, keď sa izolátor zvlhčí v dôsledku slabého dažďa, mrholenia alebo hmly, znečistená vrstva sa stáva vodivou. Preskoku po povrchu izolátora predchádza:

- výstavba vodivej vrstvy,
- formovanie suchých zón,
- čiastkové oblúčky,
- predĺženie čiastkového oblúka,
- oblúk prekrýva celú vzdialenosť a nasleduje preskok po povrchu izolátora.

Vo väčšine prípadov znečistená vrstva je nehomogénna [2]. Tvorba vrstvy znečistenia na povrchu vonkajšej izolácie sa deje vplyvom veľmi zložitých procesov. Intenzitu narastania tejto vrstvy ovplyvňuje predovšetkým koncentrácia priemyselných exhalátov, ale samozrejme závisí to aj od miestnych klimatických podmienok, od tvaru izolátora, atď. Proti narastaniu vrstvy pôsobí čistiaci účinok dažďa a vetra, hoci vietor za určitých podmienok môže napomáhať usadeniu exhalátov. Usadzovanie znečistenia na povrchu vonkajšej izolácie pod napätím silne ovplyvňuje aj rozloženie elektrického poľa pozdĺž izolátorov, ako aj procesy nabíjania častíc exhalátov pri silných korónových výbojoch v blízkosti elektród pod napätím. V neposlednom rade usadzovanie exhalátov po povrchu izolátorov ovplyvňujú aj triboelektrické javy a transport už nabitých častíc v elektrickom poli.

Rôzne druhy exhalátov môžu mať podstatne iný charakter usadzovania na povrchu izolátorov. Napr. prevádzkové pozorovania aj laboratórne pokusy potvrdili, že jemné koloidné častice (napr. popolček) za sucha sa rozložia, vplyvom nabíjania častíc v silnom elektrickom poli ako aj vplyvom triboelektrického javu, pomerne rovnomerne na vrchnom aj spodnom povrchu izolátora podobne, ako vrstva solí pri laboratórnych skúškach v hmlovej komore. V prípade priemyselných ťažších exhalátov a rozmernejších frakcií znečistenia (napr. oxid železa, cementový prach a pod.) je možné pozorovať odlišný charakter usadzovania – ide o väčší stupeň nerovnomernosti rozloženia s podstatne hrubšou vrstvou na hornom povrchu izolátorov [3].

Z fyzikálnych zákonov vyplýva, že po priložení napätia na izolátorový reťazec po jeho znečistenom povrchu začína tiecť zvodový prúd. Jeho hodnota daná momentálnou hodnotou povrchovej vodivosti, ktorá je závislá od rôznych zložitých, aj navzájom pôsobiacich okolností a podmienok [3]:

- od vplyvu komplikovanej tvorby vrstvy znečistenia,
- od spôsobu zvlhčovania tejto vrstvy v rôznych klimatických a meteorologických podmienkach,
- od tvaru a geometrických rozmerov izolátorového reťazca,
- od tepelných účinkov samotného zvodového prúdu v predchádzajúcich periódach, čo vedie k zohrievaniu znečisťujúcej vrstvy a tým k ďalšej zmene jej vodivosti.

Zvýšenie teploty prechodom zvodového prúdu má vplyv na zmenu povrchovej vodivosti dvojaký, kontroverzný účinok:

- v dôsledku záporného teplotného koeficientu mer-ného odporu elektrolytov zvýšením teploty ich elektrický odpor klesá,
- na druhej strane však zároveň zvýšenou teplotou dochádza k ubúdaniu vlhkosti a tým k zvyšovaniu odporu povrchovej vrstvy.

Na povrchu znečisteného a dostatočne zvlhčeného izolátora to väčšinou prebieha tak, že následkom vyššej teploty zníženej odpor znečisťujúcej vrstvy zapríčiňuje ďalší rast zvodového prúdu, čo má za následok ešte väčšie zvýšenie teploty. Takéto rýchle, nekontrolované zvýšenie prúdu a vodivosti môže prebiehať len do dosiahnutia bodu

varu povrchových elektrolytov. Po dosiahnutí bodu varu povrchových elektrolytov prebieha intenzívne odparovanie vlhkosti a tým zmenšenie hrúbky elektrolytu a zároveň pokles zvodového prúdu. Na povrchu izolátora sa objavujú suché zóny, kde je najväčšia hustota prúdu a takmer celé napätie je priložené k vysušenému miestu. Dochádza k elektrickému premosteniu suchej zóny – lokálnemu preskoku alebo vzniku malého (krátkeho) elektrického oblúka. Malý oblúk premostí suchú časť izolátora, ktorá sa nachádza v sérii s navlhnutou časťou. Oblúk môže zaniknúť pri prechode fázového prúdu nulou, pričom formovanie suchých a navlhčených oblastí môže trvať niekoľko hodín.

Pri zmene intenzity zrážok suchý povrch sa môže znovu navlhčiť a celý proces sa opakuje. Vznik krátkodobých oblúkov nevedie k poklesu elektrickej pevnosti izolácie. Avšak dlhodobé pôsobenie čiastkových oblúkov môže spôsobiť rozrušenie (degradáciu) povrchu izolácie a vznik zuhoľnatených stôp (ciest) – trekov, čo vedie k zníženiu hodnôt preskokových napätí.

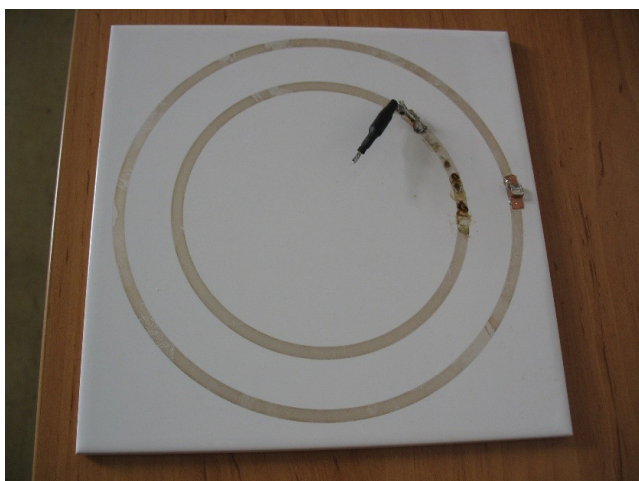
Pri určitej hodnote zvodového prúdu čiastkové oblúky nezhasínajú, ale sa rozširujú smerom k protiľahlej elektróde. K preskoku po povrchu izolácie dochádza, keď zvodový prúd je postačujúci na vysušenie celého povrchu izolácie a tiež postačujúci pre vznik stabilného oblúka.

Experiment

Cieľom experimentu bolo zistiť možnosti detekcie znečistenia vonkajšej izolácie meraním povrchového zvodového prúdu na fyzikálnom modeli tanierového izolátora v podmienkach simulujúcich čistý alebo znečistený povrch izolácie a suchý alebo vlhký povrch izolácie.

Príprava vzorky

Na prípravu strieborných elektród sa použilo koloidné striebro rozpustené v rozpúšťadle, čím vznikla homogénna pasta. Následne bola strieborná pasta nanosená sieťotlačou na povrch glazovanej keramickej podložky podľa navrhnutej geometrie elektród, pričom vzdialenosť elektród je 2 cm. Takto pripravený keramickej substrát bol vysušený a žíhaný pri teplote 700 °C počas 30 minút vo vzduchu. Geometria elektród použitá v experimente je znázornená na obrázku 1.



Obr. 1. Geometria elektród vyrobená na povrchu glazovanej keramickej podložky.

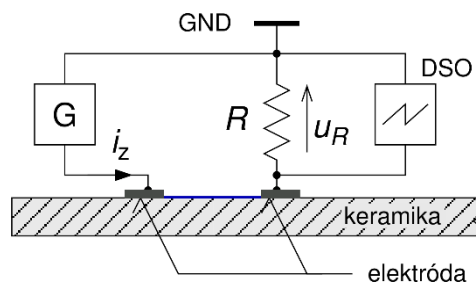
Metodológia experimentu

Pred každým meraním bola keramickej vzorka starostlivo očistená, aby sa odstránili všetky stopy nečistôt a mastnoty. Povrch glazovanej keramickej vzorky sa považuje za dostatočne čistý a bez mastnoty, ak možno pozorovať veľké súvislé mokré plochy. Po dôkladnom vyčistení sa s izolačnými časťami glazovanej keramickej vzorky manipulovalo

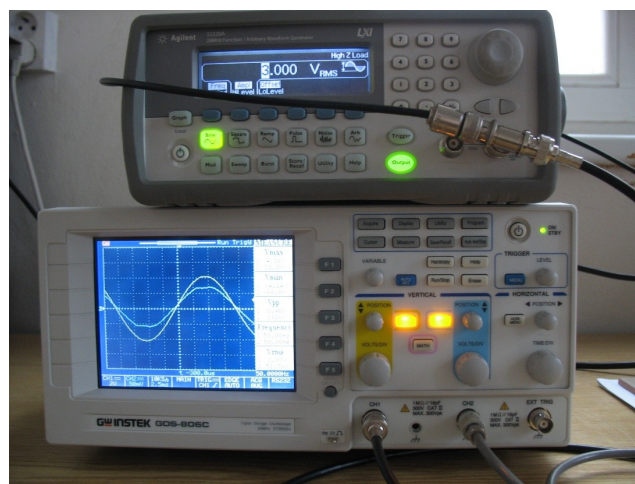
tak, aby nedošlo k znečisteniu rukou. Na suchý povrch vzorky sa naniesla rovnomerná vodivá elektrolytická vrstva (obrázok 2a) zodpovedajúca definovanému znečisteniu, vyrobená z chloridu sodného (komerčne čistého chloridu sodného) a vody z vodovodu. Takto nanosená vrstva reprezentuje znečisťujúcu vrstvu v prevádzke. Salinita prípravného roztoku zodpovedá štyrom triedam znečistenia (I až IV) podľa [4, 5]. Po vysušení roztoku sa vytvorila rovnomerne rozložená pevná vrstva (obrázok 2b).



Obr. 2. Tvorba umelého znečistenia na povrchu glazovanej keramiky: a – nanosená vodivá elektrolytická vrstva; b – vysušená pevná vrstva znečistenia.



Obr. 3. Schéma meracieho obvodu: (G – generátor signálov, R – snímací rezistor, I_z – zvodový prúd, U_R – napätie na snímacom rezistore, DSO – digitálny pamäťový osciloskop, GND – signálová zem).



Obr. 4. Merací set-up.

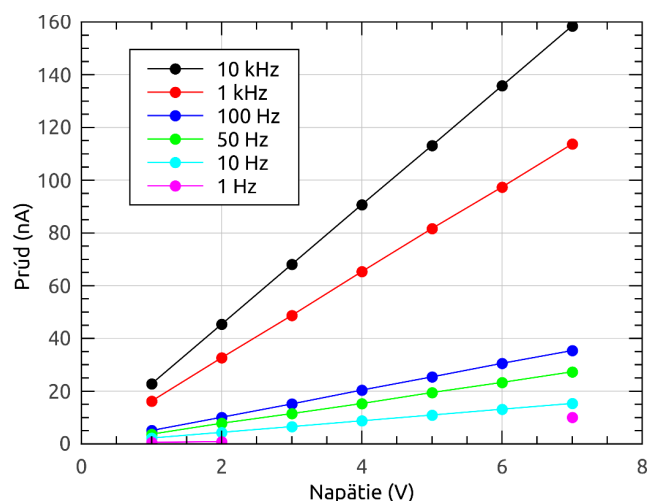
Inštrumentácia a postup merania

Schéma meracieho obvodu je znázornená na obrázku 3. Napätie sínusového tvaru, alebo obdĺžnikového tvaru pripojené k elektródam bolo generované generátorom napätových signálov Agilent 33220A. Amplitúda skúšobného napätia so sínusovým tvarom bola nastavená od 1 V do 7 V a frekvencia bola nastavená v rozsahu od 1 Hz do 10 kHz. Amplitúda obdĺžnikového tvaru bola nastavená na 5 V s frekvenciami 50 Hz a 1 kHz. Odozva elektródového systému na priložené testovacie napätie sa merala pomocou digitálneho pamäťového osciloskopu Agilent DSO 7104B.

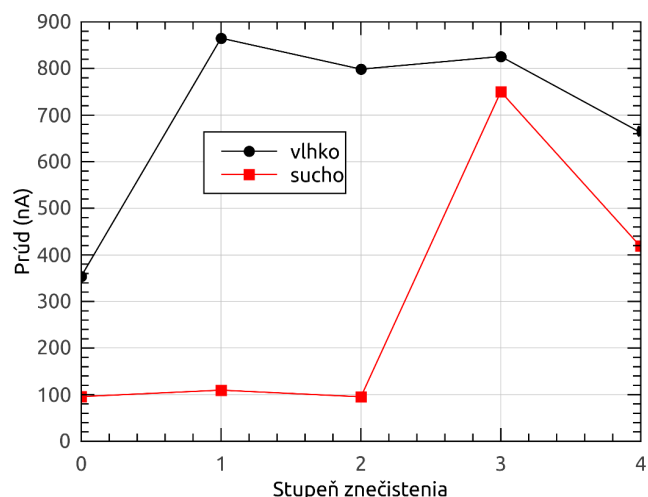
Amplitúda zvodového prúdu na povrchu vzorky bola vypočítaná podľa Ohmovho zákona ako pomer napätia a známeho odporu pripojeného k jednej elektróde. Odpor snímacieho rezistora je $R = 3,3 \text{ M}\Omega$. Pohľad na merací set-up je na obrázku 4. Na začiatku experimentu sa merala čistá a suchá vzorka. Po meraní v suchých podmienkach bol povrch vzorky navlhčený a meranie bolo okamžite opakované. Tento postup bol potom aplikovaný na vzorku so znečistenou vrstvou (stupeň znečistenia I až IV) v suchom a vlhkom prostredí.

Výsledky a vyhodnotenie

Hodnoty zvodového prúdu tečúceho cez suchý povrch bez kontaminácie glazovaného keramického povrchu medzi striebornými elektródami pri rôznych frekvenciách so sínusovým tvarom sú znázornené na obrázku 5. Ako je vidieť zo závislosti zvodového prúdu od priloženého napätia, citlivosť merania sa zvyšuje so zvyšujúcou sa frekvenciou priloženého napätia. Ďalej je zrejme, že so zvyšujúcim sa skúšobným napätím sa zvodový prúd zvyšuje lineárne.

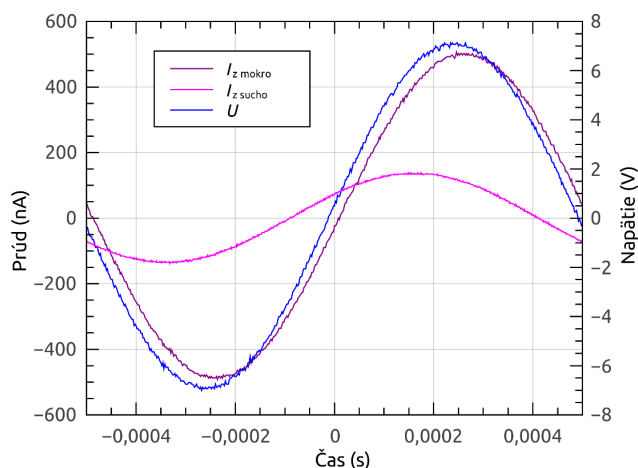


Obr. 5. Prúdovo-napätiová závislosť pri rôznych frekvenciách na suchom nekontaminovanom povrchu glazovanej keramiky.

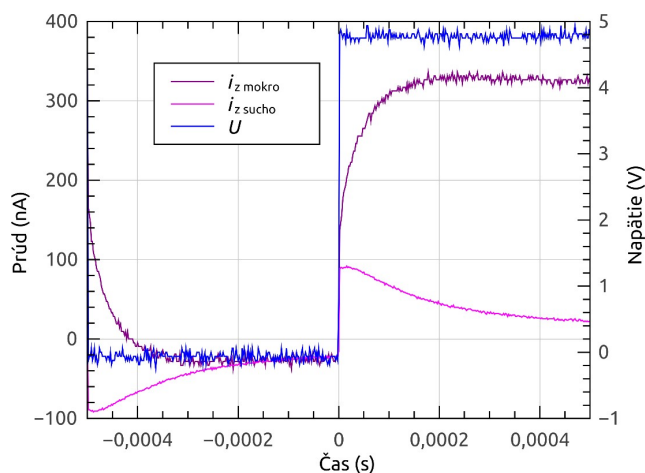


Obr. 6. Závislosť povrchového zvodového prúdu na suchom a vlhkom povrchu glazovanej keramiky pri rozličných stupňoch znečistenia a pri frekvencii 1 kHz sínusového tvaru; 0 – nekontaminovaný povrch.

Nízke frekvencie (od 1 Hz do 100 Hz) nespôsobujú uspokojivú citlivosť v dôsledku prítomnosti elektromagnetického rušenia. Na základe dosiahnutých výsledkov sa pre ďalšie experimenty použilo predvažne testovacie napätie s frekvenciou 1 kHz.



(a)



(b)

Obr. 7. Porovnanie povrchového zvodového prúdu v meracom obvode s priloženým napätím sínusového a obdĺžnikového tvaru pre suchý a mokrý povrch glazovaného keramického povrchu bez kontaminácie.

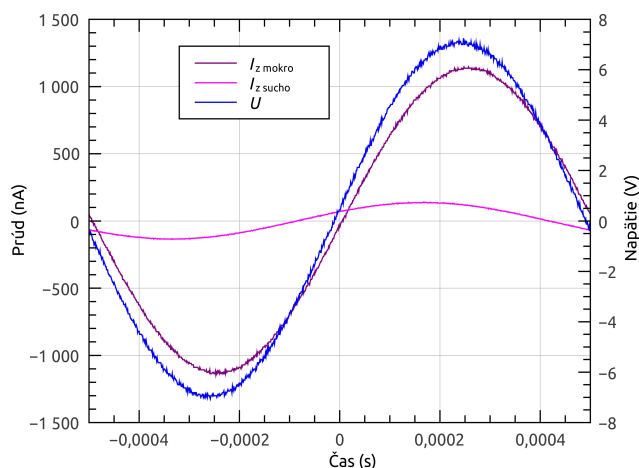
Časový priebeh testovacieho napätia a povrchového zvodového prúdu na nekontaminovanej vzorke v časovom intervale 1 ms (jedna perióda pri frekvencii 1 kHz) je znázornený na obrázku 7.

Označenie jednotlivých veličín je nasledovné: U reprezentuje napätie naprázdno priložené na strieborné elektródy, $i_{z \text{ sucho}}$ je zvodový prúd pretekajúci medzi striebornými elektródami po glazovanom keramickom povrchu bez kontaminácie a $i_{z \text{ mokro}}$ je zvodový prúd pretekajúci medzi striebornými elektródami po glazovanom keramickom povrchu za prítomnosti vlhkosti.

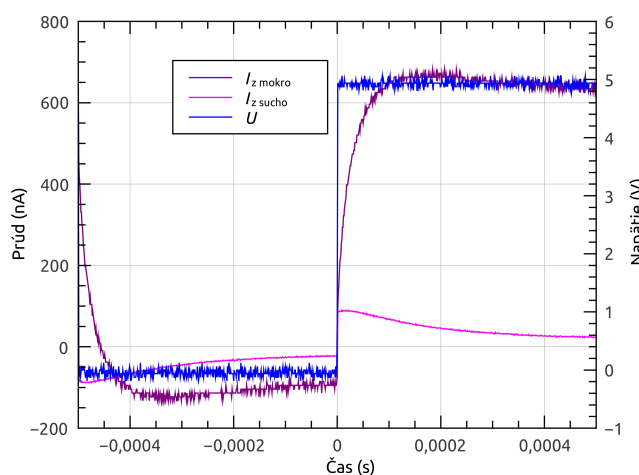
Z časových priebehov na obrázku 7a a 7b je zrejme, že zvodový prúd má nižšie hodnoty pre suchý povrch v porovnaní s povrchom po navlhčení. Tým je poukázané na tú skutočnosť, že prostredie ovplyvňuje vodivosť medzi meracími elektródami a merané napätie na snímacom rezistore je vyššie v prípade vlhkého povrchu medzi meracími elektródami.

Na obrázku 8a a 8b sú porovnané časové priebehy zvodových prúdov nameraných medzi striebornými elektródami, keď glazovaný keramický povrch je kontaminovaný roztokom s triedou znečistenia II. Z časovej závislosti na obrázku je možno konštatovať, že amplitúda zvodového prúdu je v prípade vysušených vzoriek veľmi nízka.

Po zmáčaní povrchu je však namerané značné zvýšenie zvodového prúdu, čo možno pripísať lepšej elektrickej vodivosti na povrchu glazovanej keramiky za prítomnosti vlhkosti.



(a)



(b)

Obr. 8. Porovnanie povrchového zvodového prúdu v meracom obvode s priloženým napätím sínusového a obdĺžnikového tvaru pre suchý a mokrý povrch glazovaného keramického povrchu po kontaminácii roztokom s triedou znečistenia II.

Na základe dosiahnutých výsledkov je zrejmé, že navrhovaná metodika monitorovania znečistenia životného prostredia je vhodná a citlivá na in-situ štúdie a monitorovanie izolačných vlastností vysokonapäťových izolátorov.

Záver

Znečisťujúca vrstva na izolácii elektrických zariadení má viditeľný vplyv na životnosť a spoľahlivú prevádzku inštalovaného elektrického zariadenia. Cieľom experimentu bolo určiť vplyv znečisťujúcich látok na veľkosť povrchového zvodového prúdu tečúceho po povrchu fyzikálneho modelu vonkajšej izolácie. Z nameraných údajov je zrejmé, že podmienky prostredia majú veľký vplyv na zvodový prúd (povrchovú rezistivitu) pre čistú a znečistenú izoláciu.

Experimentálne výsledky ukázali, že amplitúda zvodového prúdu tečúceho po povrchu glazovanej izolácie medzi elektródami pripojené na skúšobné napätie sa zvýšila na znečistenej vzorke vo vlhkých podmienkach. Monitorovanie unikajúceho prúdu pozdĺž povrchu vonkajšej izolácie možno použiť ako indikátor znečistenia vonkajšej izolácie.

Literatúra

- [1] Boudissa, R., Djafri, S., Haddad, A., Belaicha, R., Bearsch, R. *Effect of Insulator Shape on Surface Discharges and Flashover under Polluted Conditions*, In: IEEE Transactions on

Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, No. 3, pp. 429-437, June 2005

- [2] Palangar, M.F., Mirzaie, M. *Diagnosis of Porcelain and Glass Insulators Conditions Using Phase Angle Index*, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, pp. 1460-1466, June 2016
- [3] Csaji, P., *Určovanie stupňa znečistenia vonkajších izolátorov VVN*, kandidátska dizertačná práca, Košice, máj 1986, p.171.
- [4] IEC 60071-2:1996 Insulation co-ordination – Part 2: Application guide. International standard.
- [5] EN 60507:2014 Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems.
- [6] IEC 507:1991, Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems. International standard.

Autori vyjadrujú poďakovanie Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA-1/0132/15, VEGA-1/0311/15 a VEGA-2/0141/16.

Túto prácu podporila Slovenská agentúra pre výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-15-0438.

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).



Európska únia



Operačný program
VÝSKUM a VÝVOJ

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu „Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky“, ITMS 26220120055.



Európska únia



Operačný program
VÝSKUM a VÝVOJ



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. We support research activities in Slovakia/This project is being co-financed by the European Union. Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj, pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICO pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií, kód ITMS: 26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Autori: Iraida Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: iraida.kolcunova@tuke.sk

Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: bystrik.dolnik@tuke.sk

Jaroslav Briancin, Ústav Geotechniky, Slovenská akadémia vied, Košice, Watsonova 45, 043 53 Košice, E-mail: briancin@saske.sk

Martin Fabián, Ústav Geotechniky, Slovenská akadémia vied, Košice, Watsonova 45, 043 53 Košice, E-mail: fabianm@saske.sk