

Bystrík Dolník, Irida Kolcunová

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

Vplyv vlhkosti na zmenu zvodových prúdov po povrchu znečistených izolantov

Abstrakt. V článku je opísaný návrh meracieho obvodu, príprava pracoviska a experimentálne merania zvodových prúdov na modeli tanierového izolátora. Environmentálne podmienky sú simulované umelým znečisťovaním povrchu modelu tanierového izolátora jednotlivými stupňami znečistenia za sucha a za vlhka umelým zvyšovaním relatívnej vlhkosti od 50 % do 99 %. Výsledky experimentov sú prezentované pomocou grafických závislostí a diskusiou. Experimentálnymi meraniami boli preukázané výrazné zmeny veľkosti zvodového prúdu pri zvýšenej relatívnej vlhkosti od 70 %.

Abstract. The article describes the design of the measuring circuit, the workplace preparation and the experimental measurement of the leakage currents on the plate insulator model. The environmental conditions are simulated by artificially polluting the surface of the plate insulator model with dry and humid levels of moisture by artificially raising relative moisture from 50 % to 99 %. The experimental results are presented using graphical dependencies and discussion. Experimental measurements have shown significant changes in amplitude of leakage current at an increased relative humidity above 70%. (**The influence of moisture on the change of leakage currents on the surface of contaminated insulators**).

Kľúčové slová: izolátor; model; znečistenie; vlhkosť; zvodový prúd.

Keywords: insulator; model; pollution; humidity; leakage current.

Úvod

V súčasnosti existuje veľký dopyt po kvalitnej elektrickej energii. Táto skutočnosť má za následok zvyšovanie výroby a distribúcie elektrickej energie. Spôľahlivosť výroby a distribúcie elektrickej energie je silne závislá od kvality izolačného systému.

V každom prostredí, kde sú použité izolátory, vyskytuje sa určitá hladina znečistenia. Znečistenie môže obsahovať usadeniny, ktoré majú pri navlhnutí veľkú vodivosť, čo má za následok zvýšenie hodnoty zvodového prúdu, alebo v niektorých prípadoch vedie dokonca aj k elektrickému preskoku. Elektrický preskok môže spôsobiť degradáciu povrchu izolátora a následne môže viesť až k jeho zničeniu. Kvôli týmto rizikám je potrebné monitorovať znečistenie izolačných systémov [1–3].

S narastajúcou vodivosťou znečistenia povrchu izolátora narastá priamo úmerné hodnota zvodového prúdu. Preto jedna z možností, ako monitorovať znečistenie izolácie elektrických zariadení, je kontinuálne sledovanie zvodového prúdu tečúceho po povrchu izolátora [1], [4], [5].

Experiment

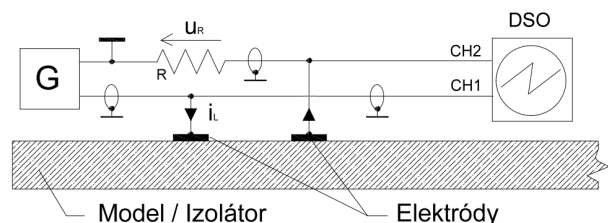
Cieľom experimentálnych meraní bolo zistiť možnosti detekcie znečistenia vonkajšej izolácie meraním zvodového prúdu tečúceho po povrchu modelu tanierového izolátora. Merania boli vykonávané za suchých a vlhkých podmienok na čistom a znečistenom povrchu modelu izolátora pri rôznych stupňoch znečistenia.

Merací obvod

Na obr. 1 je znázornená schéma zapojenia meracieho obvodu pre meranie zvodového prúdu po povrchu modelu tanierového izolátora. Obvod sa skladá z generátora napäťových signálov AGILENT 33220A, digitálneho pamäťového osciloskopu AGILENT DSO 7104B, snímacieho rezistora a modelu tanierového izolátora. Vlhkosť prostredia v ktorom je model izolátora umiestnený je vyhodnocovaná vlhkomerom EXTECH 445815.

Na privedenie elektrického signálu z modelu izolátora k osciloskopu boli použité dva tienené vodiče s cieľom znížiť na minimum galvanickú a kapacitnú väzbu, cez ktoré

sa môže zavliecť rušiacie napätie na vstup osciloskopu. Taktiež bola vyhotovená tienená kovová krabica, do ktorej bol umiestnený snímací rezistor, s cieľom zabrániť prieniku rušenia do meracieho obvodu.



Obr. 1 Schéma zapojenia meracieho obvodu na meranie zvodového prúdu po povrchu modelu tanierového izolátora

Na snímacom rezistore boli zaznamenávané časové priebehy úbytkov napätia spôsobené prechodom zvodového prúdu cez snímací rezistor pomocou DSO. Pripojenie rezistora k meracej elektróde bolo urobené pomocou tieneného koaxiálneho kábla. Odpor snímacieho rezistora $R = 1,03 \text{ M}\Omega$.

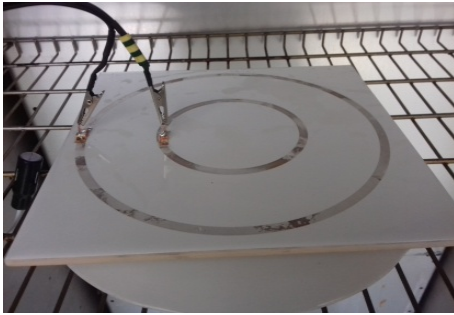
Model tanierového izolátora

Model je zložený z keramickej podložky so štvorcovou podstavou na ktorej sú nanosené dve elektródy kruhového tvaru. Vzdialenosť elektród je 4 cm. Model tanierového izolátora použitý v experimente, ktorého povrch je umelo kontaminovaný I. stupňom znečistenia, je znázornený na obr. 2.

Znečisťovanie izolátora

Pred každým meraním sa model tanierového izolátora starostlivo vyčistil, aby sa odstránili všetky stopy nečistôt a mastnoty z povrchu. Povrch glazovanej keramickej vzorky sa považuje za dostatočne čistý a bez mastnoty, ak možno pozorovať veľké súvislé mokré plochy.

Po dôkladnom očistení sa s izolačnými časťami glazovanej keramickej vzorky manipulovalo tak, aby nedošlo k znečisteniu rúk.



Obr. 2 Model tanierového izolátora s nanosenou vrstvou zodpovedajúcou I. stupňu znečistenia

Po vysušení povrchu vzorky sa naniesla rovnomerná vodivá elektrolytická vrstva zodpovedajúca definovanému znečisteniu. Vodivý roztok bol vyrobený z chloridu sodného (komerčne čistého chloridu sodného NaCl), čistej vody z vodovodu a kaolínu. Množstvo NaCl bolo rozpustené vo vode podľa odporúčania v norme [1]. Vodivosť roztoku bola skontrolovaná pomocou konduktometra. Vrstva nanosená na povrch modelu zmáčaním reprezentuje znečisťujúcu vrstvu v prevádzke. Sálinita pripraveného roztoku zodpovedá štyrom stupňom znečistenia (I až IV). Po vysušení roztoku sa na povrchu modelu vytvorila rovnomerne rozložená pevná vrstva.

Postup merania

Meranie zvodového prúdu za sucha na čistom alebo znečistenom povrchu bolo realizované pri izbovej teplote v uzavretej elektrickej sušičke. Sušička bola pred meraním dostatočne vyvetraná (minimálne 12 hodín), aby v interiéri sušičky nebola relatívna vlhkosť väčšia ako je relatívna vlhkosť okolia. Do sušičky sa umiestnil model tanierového izolátora. Prvé meranie bolo realizované za sucha v uzavretej sušičke.

Po realizovaní merania za sucha boli urobené merania pri zvýšenej vlhkosti. Merania sa vykonávali pri viacerých hodnotách skúšobného napätia (1 V až 7 V) a pri dvoch vybratých frekvenciách (113 Hz a 1 kHz). Dôležité bolo optimálne regulovanie relatívnej vlhkosti v interiéri sušičky tak, aby hodnota relatívnej vlhkosti bola stabilná aspoň 7 minút s odchýlkou max. $\pm 2\%$. Zvýšená relatívna vlhkosť bola regulovaná od 50 % do 90 % po 10 %-ných krokoch. Ako posledná bola regulovaná relatívna vlhkosť 99 %. Hodnota relatívnej vlhkosti vo vnútri elektrickej sušičky bola kontrolovaná pomocou digitálneho vlhkomera.

Vyhodnocované veličiny

Počas experimentálnych meraní na modeli tanierového izolátora boli vyhodnocované nasledovné veličiny: pre harmonické testovacie napätie – zvodový prúd (efektívna hodnota), fázový posun; pre neharmonické testovacie napätie (periodický jednotkový skok) – amplitúda zvodového prúdu, ustálená hodnota zvodového prúdu, fázový posun a elektrický náboj.

Zvodový prúd tečúci po povrchu vzorky bol vypočítaný podľa Ohmovho zákona. Fázový posun medzi skúšobným napätím a zvodovým prúdom bol vypočítaný využitím funkcionality implementovanej v DSO nasledovne

$$\varphi = 360 \cdot \Delta t \cdot f_s, \quad (1)$$

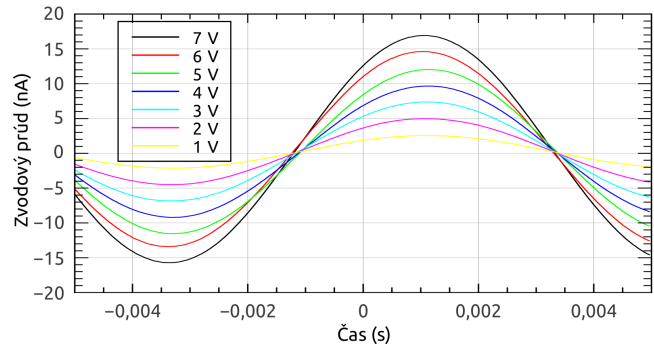
kde: φ – fázový posun, Δt – časový rozdiel medzi kanálmi DSO v okamihu prechodu napätia na vstupe DSO nulou, f_s – frekvencia skúšobného napätia.

Amplitúda zvodového prúdu bola stanovená priamo využitím funkcionality implementovanej v DSO, ustálená

hodnota zvodového prúdu bola definovaná ako predposledná hodnota periódy skúšobného napätia. Elektrický náboj bol vypočítaný pomocou numerického integrálu obdĺžnikovou metódou.

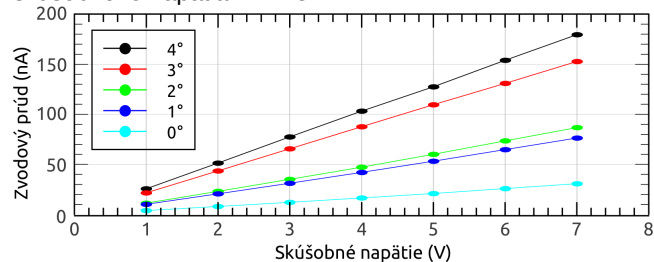
Výsledky merania

Priložením skúšobného striedavého napätia na model tanierového izolátora tiekol po povrchu modelu zvodový prúd sínusového priebehu. Po nanosení znečisťujúcej vrstvy zodpovedajúcej jednotlivým stupňom znečistenia sa tvar sínusového priebehu zvodového prúdu nezmenil, t.j. neobsahoval vyššie harmonické zložky. S narastajúcou amplitúdou skúšobného striedavého napätia narastala amplitúda zvodového prúdu lineárne.

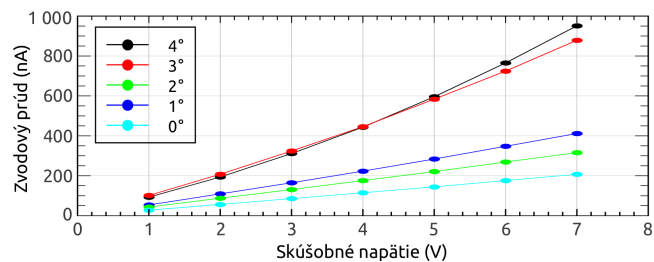


Obr. 3 Závislosť zvodového prúdu od času na čistom modeli tanierového izolátora pri RH = 29 %; $f = 113$ Hz

Na obr. 3 je zobrazená časová závislosť zvodového prúdu na modeli tanierového izolátora bez znečistenia pri relatívnej vlhkosti vzduchu 29 % (za sucha); frekvencia skúšobného napätia $f = 113$ Hz.



Obr. 4 Závislosť I_z od skúšobného napätia; $f = 113$ Hz, RH = 50 %



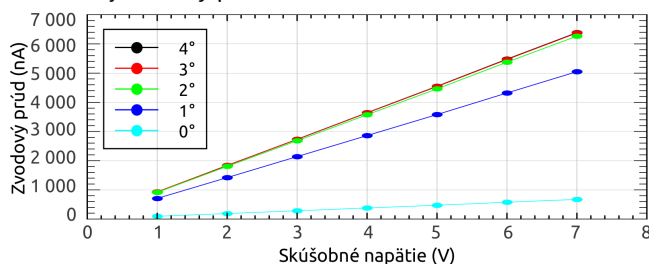
Obr. 5 Závislosť I_z od skúšobného napätia; $f = 113$ Hz, RH = 70 %

Lineárny nárast zvodového prúdu I_z s narastajúcim skúšobným napätím bol pozorovaný pre všetky stupne znečistenia na povrchu modelu tanierového izolátora.

Na obr. 4 až obr. 6 uvádzame závislosť zvodového prúdu od striedavého skúšobného napätia s frekvenciou 113 Hz pre relatívne vlhkosti vzduchu 50 %, 70 % a 99 %. V každej menovanej závislosti parametrom je stupeň znečistenia povrchu modelu tanierového izolátora.

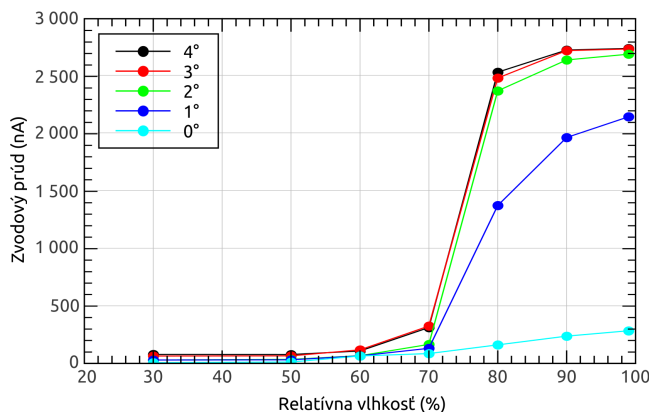
Z grafických závislostí na obr. 4 až obr. 6 je vidieť, že najmenší zvodový prúd tečie po suchom a čistom povrchu

modelu tanierového izolátora. S narastajúcim stupňom znečistenia a s narastajúcou relatívnou vlhkosťou vzduchu narastá aj zvodový prúd.



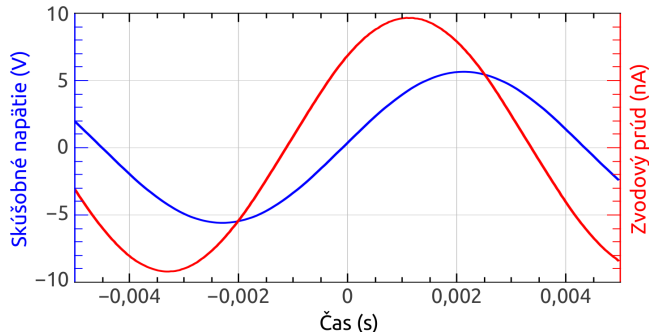
Obr. 6 Závislosť I_2 od skúšobného napätia; $f = 113$ Hz, RH = 99 %

Pri dosiahnutí určitej vlhkosti prostredia môže dôjsť k tomu, že s ďalším zvyšovaním vlhkosti a zvyšujúcim sa stupňom znečistenia, zvodový prúd už nenarastá, ale dochádza k presýteniu.



Obr. 7 Závislosť striedavého zvodového prúdu I_2 od relatívnej vlhkosti vzduchu; $f = 113$ Hz, $U_s = 3$ V

Na obr. 7 je zobrazená závislosť striedavého zvodového prúdu od relatívnej vlhkosti vzduchu na modeli tanierového izolátora pri skúšobnom napätí $U_s = 3$ V. Parametrom je stupeň znečistenia na povrchu modelu tanierového izolátora; frekvencia skúšobného napätia je $f = 113$ Hz. Z obr. 7 je vidieť, že za suchých podmienok až do relatívnej vlhkosti vzduchu 70 % nedošlo k výraznej zmene efektívnej hodnoty zvodového prúdu. Z grafickej závislosti na obr. 7 je vidno, že pri relatívnej vlhkosti vzduchu nad 70 % zvodový prúd na modeli tanierového izolátora so znečisteným povrchom prvým stupňom znečistenia má pomerne rýchly nárast.

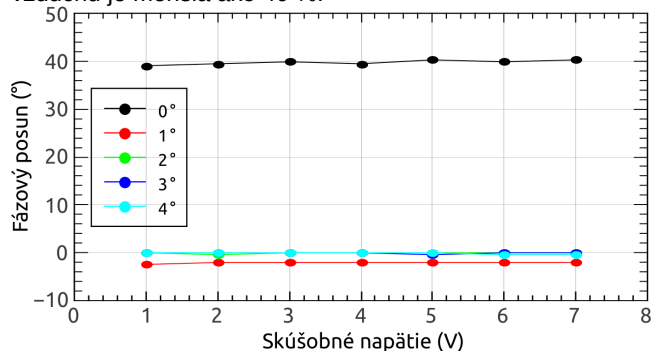


Obr. 8 Časová závislosť skúšobného napätia a zodpovedajúceho zvodového prúdu I_2 na čistom povrchu modelu tanierového izolátora za sucha

Pri meraniach na modeli so znečisteným povrchom stupňom znečistenia II, III a IV narastala hodnota zvodového prúdu veľmi rýchlo pri relatívnej vlhkosti

vzduchu 70 % až 80 %. Keď relatívna vlhkosť vzduchu je väčšia ako 80 % (až po 99 %), zvodový prúd pri II, III a IV stupni znečistenia je už nasýtený. Medzi skúšobným napätím a zvodovým prúdom tečúcim po povrchu modelu tanierového izolátora existuje fázový posun. Tento fázový posun je spôsobený tým, že čistý povrch modelu medzi snímacími elektródami je za sucha takmer nevodivý a správa ako technický kondenzátor.

Na obr. 8 je zobrazená časová závislosť skúšobného napätia priloženého na elektródový systém modelu tanierového izolátora a zodpovedajúceho zvodového prúdu tečúceho po čistom povrchu za sucha, t.j. relatívna vlhkosť vzduchu je menšia ako 40 %.

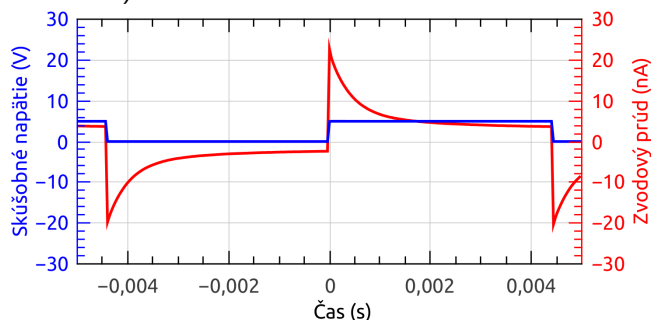


Obr. 9 Závislosť fázového posunu od testovacieho napätia na modeli tanierového izolátora; $f = 113$ Hz, RH = 99 %

Na obr. 9 je zobrazená závislosť fázového posunu od skúšobného napätia na modeli tanierového izolátora pri frekvencii 113 Hz a relatívnej vlhkosti vzduchu 99 %. Z grafickej závislosti na obr. 9 je vidieť, že:

1. fázový posun je pri rovnakom stupni znečistenia takmer nemenný (nezávislý od skúšobného napätia);
2. fázový posun je pre rôzne stupne znečistenia rôzny, až na prípad zvýšenej a extrémnej relatívnej vlhkosti vzduchu.

Ďalej možno povedať, že fázový posun ostáva takmer konštantný aj pri zmene skúšobného napätia (v rozsahu od 1 V do 7 V).

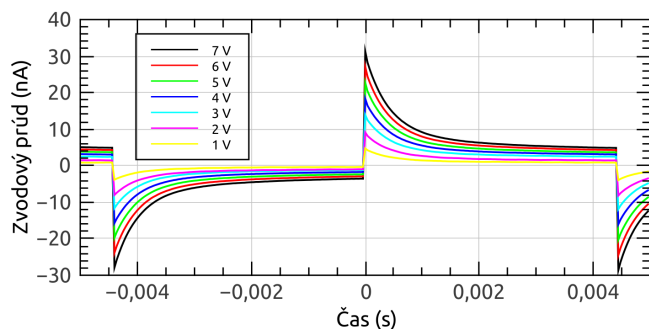


Obr. 10 Časová závislosť skúšobného napätia (periodický jednotkový skok) a zodpovedajúceho zvodového prúdu I_2 na čistom povrchu modelu tanierového izolátora za sucha; $f = 113$ Hz

Na obr.10 je zobrazený časový priebeh zvodového prúdu tečúceho po povrchu modelu tanierového izolátora po priložení periodického jednotkového napätového skoku.

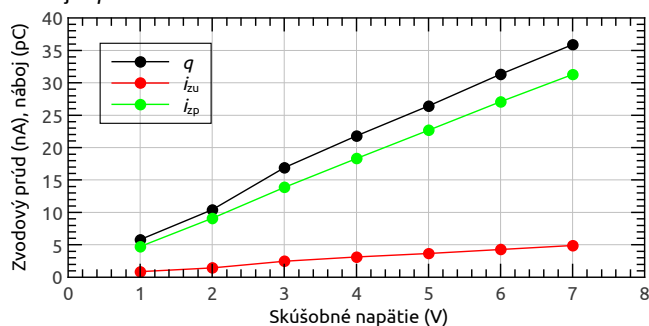
Z obrázku je vidno, že s nábežnou hranou impulzu napätia zvodový prúd rýchlo narastá až do maxima. Po dosiahnutí maxima, zvodový prúd pozvoľne klesá do okamihu náhleho poklesu skúšobného napätia na nulovú hodnotu, kedy zvodový prúd začne rýchlo narastať s opačnou polaritou. Opísaný dej sa periodicky opakuje.

Na obr. 11 je zobrazená časová závislosť zvodového prúdu na modeli tanierového izolátora bez znečistenia pri relatívnej vlhkosti vzduchu 29 % (za sucha); frekvencia skúšobného napätia $f = 113$ Hz.



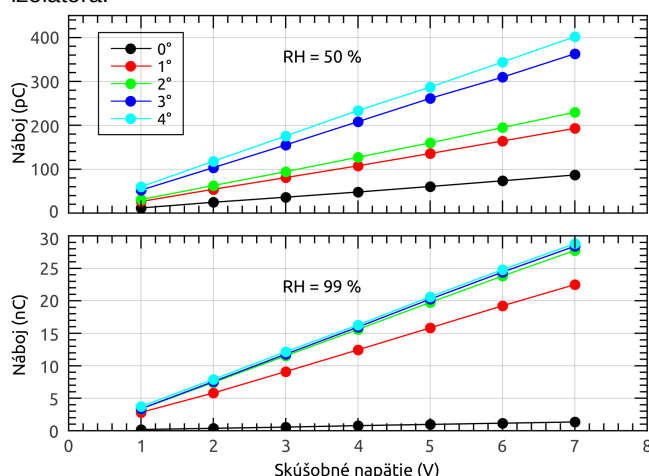
Obr. 11 Závislosť zvodového prúdu od času na čistom modeli tanierového izolátora pri RH = 29 %; $f = 113$ Hz, periodický jednotkový napätový skok

Z časového priebehu na obr. 11 možno vidieť, že pri konštantnej relatívnej vlhkosti vzduchu je amplitúda zvodového prúdu lineárne závislá od amplitúdy priloženého skúšobného napätia. Okrem lineárnej závislosti amplitúdy zvodového prúdu bola zistená lineárna závislosť ustálenej hodnoty zvodového prúdu i_{zu} a preneseného elektrického náboja q .



Obr. 12 Závislosť amplitúdy zvodového prúdu i_{zp} , ustálenej hodnoty zvodového prúdu i_{zu} a preneseného elektrického náboja q od priloženého skúšobného napätia na čistom modeli tanierového izolátora pri RH = 29 %; $f = 113$ Hz, periodický jednotkový napätový skok

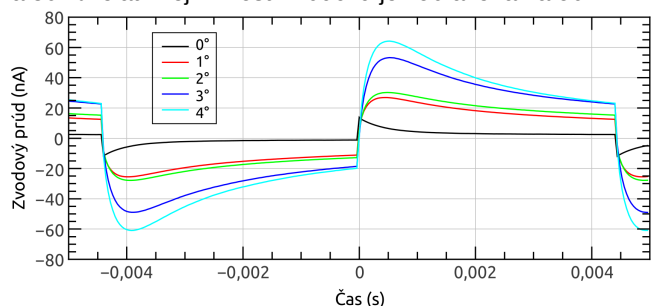
Ako príklad uvádzame na obr. 12 závislosť amplitúdy zvodového prúdu, ustálenej hodnoty zvodového prúdu a preneseného elektrického náboja od priloženého skúšobného napätia na čistom a suchom modeli tanierového izolátora.



Obr. 13 Závislosť preneseného elektrického náboja od priloženého skúšobného napätia na modeli tanierového izolátora pri RH = 50 % a RH = 99 %; $f = 113$ Hz, periodický jednotkový napätový skok, parameter je stupeň znečistenia povrchu modelu tanierového izolátora

Na obr. 13 je pre porovnanie uvedená závislosť preneseného elektrického náboja od skúšobného napätia. Parameter je stupeň znečistenia povrchu modelu tanierového izolátora. Z grafickej závislosti je zrejmé, že s narastajúcim stupňom znečistenia narastá aj prenesený elektrický náboj. Navyše možno konštatovať, že pomer preneseného elektrického náboja pri relatívnej vlhkosti vzduchu 99 % a preneseného elektrického náboja pri relatívnej vlhkosti vzduchu 50 % presahuje dva rády.

Pri meraní zvodového prúdu pomocou periodického jednotkového napätového skoku sa so zmenou stupňa znečistenia mení aj tvar časového priebehu zvodového prúdu, menovite: amplitúda, čelo a tylo. Zmena tvaru zvodového prúdu pri priložení periodického jednotkového napätového skoku s frekvenciou 113 Hz pri rôznych stupňoch znečistenia povrchu modelu tanierového izolátora a 50 % relatívnej vlhkosti vzduchu je zobrazená na obr. 14.



Obr. 14 Časová závislosť zvodového prúdu modeli tanierového izolátora pri RH = 50 %; $f = 113$ Hz, periodický jednotkový napätový skok s amplitúdou 3 V, parameter je stupeň znečistenia

Numerickým integrovaním kladnej polperiódy časového priebehu zvodového prúdu bol vypočítaný prenesený elektrický náboj. Hodnoty preneseného elektrického náboja, ako už bolo spomenuté, sú zobrazené graficky na obr. 13 pre relatívnu vlhkosť vzduchu RH = 50 % a RH = 99 %.

Záver

Znečistenie, ktoré sa usadzuje na izolácii elektrických zariadení, nepriaznivo vplyva na životnosť a spoľahlivosť celej elektrickej sústavy. Počas experimentov sme sledovali trend elektrofykálnych veličín (zvodový prúd, fáza) na vyrobenom modeli tanierového izolátora pri definovaných environmentálnych podmienkach (znečistenie, relatívna vlhkosť vzduchu) a pri stanovených testovacích napätiach. Environmentálne podmienky boli modelované nanášaním znečisťujúcej vrstvy na povrch modelu tanierového izolátora so stupňami znečistenia podľa normy IEC 60507, a zmenou relatívnej vlhkosti prostredia.

Popisné charakteristiky elektrofykálnych veličín môžu byť závislé aj od materiálov izolátora (napr. porcelán, sklo, plast), preto je nutné vykonať ďalšie merania na rôznych druhoch izolátorov.

Napriek tomu, že je potrebné vykonať ešte mnoho experimentálnych meraní, možno povedať, že meranie zvodového prúdu je vhodný indikátor pre monitorovanie úrovne znečistenia izolátorov.

Literatúra

- [1] Kolcunová, I., Dolník, B., Briančin, J., Fabián, M.: *Meranie zvodových prúdov na modeli tanierového izolátora*. In: *Starnutie elektroizolačných systémov*, roč. 12, č. 1, s. 15-18. [online]. Košice: TUKE. [2017]. [cit. 30. 6. 2018]. Dostupné na internete: <<http://jeen.fe.i.tuke.sk/index.php/JSES/article/view/427/460>>.
- [2] Farzaneh, M., Chisholm, W.: *Insulators for Icing and Polluted Environments*, Wiley – IEEE Press, 2009, 706 s. ISBN 978-0-470-28234-2.
- [3] IEC 60507: 2013, Artificial pollution tests on high-voltage

ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems.

- [4] Evaluation of Station Post Porcelain Insulators with Room Temperature Vulcanized (RTV) Silicone Rubber Coatings, PSERC Publication 12-19, Final Project Report. [online]. [cit. 30. 6. 2018]. Dostupné na internete: <https://pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2012_reports/T-46G_Final-Report_ExecSum_July-2012.pdf>.
- [5] PNE 33 0405-1: 2014, Navrhování venkovní elektrické izolace podle stupně znečištění. Část 1: Porcelánové a skleněné izolátory pro sítě se střídavým napětím.



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.

Autori vyjadrujú poďakovanie Agentúre na podporu výskumu a vývoja za podporenie tejto práce v rámci projektu APVV-15-0438, Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a SAV VEGA 2/0141/16, 1/0340/18.

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

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