

Roman Cimbala

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

Povrchový odpor a povrchový merný odpor

Abstrakt. Tento príspevok sa zaoberá problematikou sledovania povrchového odporu izolačných materiálov. Je analyzovaný vývoj skúšobných metód pre povrchy s nízkou aj vysokou vodivosťou. V článku je popísaný experiment pre získanie zvolených kvalitatívnych parametrov popisujúcich stav povrchu izolačného systému na báze celulózy. Sú vyhodnotené časové závislosti nabíjajúcich prúdov vzhľadom na aplikované napätie aj hrúbku skúmaného materiálu.

Abstract. This paper deals with the monitoring of surface resistance of insulating materials. The development of test methods for both low and high conductivity surfaces is analyzed. An experiment is described in the article for obtaining selected qualitative parameters describing the state of the surface of a cellulose-based insulating system. The time dependencies of charging currents are evaluated against both the applied voltage and the thickness of the material under investigation.

Kľúčové slová: povrchový odpor, povrchový merný odpor, elektrizácia, nabíjanie.

Keywords: surface resistance, surface resistivity, electrization, charging.

Úvod

Na začiatku je potrebné si uvedomiť, že je rozdiel medzi fyzikálnymi vlastnosťami a ich interpretáciou - povrchovým odporom a povrchovým merným odporom. Napriek tomu, že sa na tieto parametre sústredili viaceré diskusie, sú stále pravdepodobne najdôležitejšie v odvetví ESD (electrical surface discharges). Pracovníci v oblasti ESD potrebujú jasne pochopiť, aké sú rozdiely pri vykonávaní výberov materiálov a v ich nasadzovaní pracovnom prostredí vzhľadom na ich povrchový odpor.

Teoretické základy

Povrchový odpor v Ωm sa používa na určenie kvality izolačných materiálov, na ktoré sú kladené požiadavky na vysokú odolnosť. Povrchový odpor v ohmoch sa zvyčajne určuje meraním na obalových materiáloch, pri ktorých sú potrebné nižšie odporové charakteristiky.

ASTM D-257 Povrchový odpor

Veľa rokov sa na klasifikáciu obalových materiálov kontrolovaných na ESD používajú merania povrchovej rezistivity. Všeobecne používanými metódami sú štandardné testovacie metódy ASTM D-257 pre jednosmerný odpor alebo vodivosť izolačných materiálov. ASTM D-257 meria odporové alebo vodivé vlastnosti izolačných materiálov skôr ako rozptylové charakteristiky materiálov na kontrolu ESD. Bez ohľadu na jeho názov sa ASTM D-257 používa v celom vojenskom a komerčnom svete na klasifikáciu vlastností obalových materiálov v jednosmernom poli, kde je potrebná vyššia vodivosť umožňujúca odvedenie povrchového náboja (disipatívnych materiálov).

Odstránenie nesprávneho používania ASTM D-257

Koncom osemdesiatych rokov výbor ASTM D-9 oznámil Výboru pre elektronické obaly elektronických výrobkov (PEPS) od Electronics Industries Association (EIA), že používanie ASTM D-257 na vyhodnocovanie obalových materiálov bolo technicky nesprávne. Výbor D-9 uviedol, že jeho použitie na vyhodnotenie disipatívnych materiálov viedlo k chybám a požadoval, aby normy EIA Standard 541 Packaging Material Standards pre položky určené na ESD obmedzili ASTM D-257 ako skúšobnú metódu pre materiály určené pre elektrostatické aplikácie - ESD.

Odporúčanie výboru na zmenu vychádzalo zo skutočnosti, že ASTM D-257 obsahuje niekoľko postupov

na meranie a vyhodnocovanie izolačných materiálov s vysokým povrchovým odporom a poskytuje najhorší scenár na posúdenie najnižšieho odporového odporu izolačného materiálu, ktorý udáva najnižšie izolačné vlastnosti materiálu. Skúšobná metóda špecifikuje vysoké testovacie napätie, strednú až vysokú relatívnu vlhkosť (RH) a vysoký tlak testovacieho prístroja na zníženie kontaktného odporu, pričom merania sa týkajú izolácií s veľkým rozsahom odporu.

Pri hodnotení materiálov so statickým rozptylom – disipatívnych materiálov potrebujete poznať najvyšší odpor, ktorý môže zabrániť pohybu statického náboja smerom k nižšiemu potenciálu. Inými slovami, metóda ASTM D-257 na hodnotenie izolačných vlastností poskytuje najhoršiu možnú informáciu o kvalite materiálu pre aplikáciu v ESD odvetví, ako aj nekonzistentné meranie disipatívnych produktov.

Na potvrdenie stanoviska výboru pracovná skupina ESD pre EES PEPS č. 1 vykonala skúšku "round-robin" medzi piatimi laboratóriami s použitím piatich identických súborov vzoriek. Každé laboratórium testovalo súbory vzoriek za kontrolovaných podmienok použitím svojej interpretácie ASTM D-257. Analýza údajov z testov z laboratórií ukázala, že použitím ASTM D-257 na vyhodnotenie staticky kontrolovaných materiálov došlo k rozdielu medzi laboratóriami štatisticky 4. rádu.

Vyhodnotenie problému

Prvým cieľom bolo určiť, čo sa meralo a prečo bol takýto rozdiel nájdený. Pracovná skupina dospela k záveru, že izolátory sú vysoko odolné homogénne materiály určené na zabránenie toku elektrónov cez ich povrch; statické disipatívne materiály boli materiály s nižším odporom, určené na umožnenie toku elektrónov cez a pod ich povrchom.

Disipatívne materiály nie sú homogénne, pretože môžu pozostávať z akejkoľvek kombinácie vodičov, organických chemikálií alebo kovov. Tieto prísady podporujú tok elektrónov, zatiaľ čo izolátory sú vyrobené z čisto nevodivých materiálov. Metóda ASTM hodnotí charakteristiky povrchového odporu jednotných izolátorov a nie je vhodná na vyhodnocovanie zložitých nehomogénnych disipatívnych materiálov obsahujúcich vodivé prvky. Je to chyba v aplikácii zvolenej metodiky merania a vyhodnocovania.

Účinky vlhkosti

ASTM D-257 odporúča skúšobné materiály v relatívnej vlhkosti 50% alebo vyššej. Vlhkosť poskytuje na povrchu materiálu vodivú vrstvu, ktorá znižuje ochranné vlastnosti izolátora tým, že zvyšuje tok elektrónov a odolnosť statických materiálov. Naopak, nízka Rh zvyšuje odolnosť izolátora a znižuje funkciu disipatívneho materiálu.

Elektródový systém

ASTM D-257 sa zaoberá viacerými konfiguráciami elektródového systému pre meranie povrchového odporu. Úlohou elektródového systému je určiť definovaný odpor povrchovej časti materiálu; to znamená, odpor v ohmoch / m². Z fyzikálneho princípu vyplýva, že je možné používať akékoľvek usporiadanie elektródového systému, pokiaľ je definovaná jeho konfigurácia a rozmery. EIA Task Force # 1 definuje použitie sústredných krúžkov na meranie staticky disipatívnych materiálov, ale pri posudzovaní disipatívnych materiálov vznikli ďalšie rozdielne konštrukcie a materiálové zloženia.

Tlak pripevnenia

Vysoký tlak (2 až 10 MPa) sa aplikuje na skúšobné telesá s sústredným krúžkom alebo obdĺžnikom na zníženie odporu kontaktov medzi skúšanými elektródami a skúšaným izolátorom a na posúdenie jeho najviac vodivých vlastností. Elektronické zariadenia chránené materiálmi určenými na ESD sú relatívne ľahké a často majú dodatočný kontaktný odpor v dôsledku ich konfigurácie. V dôsledku toho vysoký tlak elektródy narúša funkčnú odolnosť disipatívnych materiálov, čo následne môže znížiť ich funkčné vlastnosti.

Skúšobné napätie a prúd

Pred výpočtom povrchového odporu sa na materiál aplikuje dlhší čas skúšobné napätie 500 V alebo vyššie. Tieto vyššie skúšobné napätia sú potrebné na presné meranie izolátorov a na meranie nižšieho odporu je vhodnejšie nízke skúšobné napätie. Je potrebné si uvedomiť, že pri tom dochádza k procesu nabíjania materiálu (elektrizácia » elektrizovanie, nabíjanie telies elektrickým prúdom), pri ktorom nastáva zachytávanie voľných nosičov náboja skúšaným materiálom. Tento jav je časovo závislý.

Vysoké skúšobné napätia aplikované na materiály ESD s pomerne nízkym odporom vytvárajú významný tok prúdu, ktorý mení charakteristiky materiálu a poskytuje nižšiu indikáciu odporu. Ak sa na disipatívny materiál používa 500 V, ako je uvedené v norme ASTM D-257, tok prúdu je niekoľko rádov vyšší ako tok cez izolátor.

Vysoký tok prúdu spôsobuje rozklad materiálu alebo uhlíkové stopy medzi vodivými prvkami a laminovacími vrstvami. Výsledkom sú nepravidelné merania, poškodený materiál a falošná indikácia kvality materiálu.

Doba nabíjania

Použitie skúšobného napätia zariadenia na určitý čas pred zaznamenaním merania sa označuje ako čas nabíjania. Pri meraniach izolátorov vytvárajú dlhé časy nabíjania nižšiu indikáciu odporu. Pri meraní disipatívnych materiálov môžu dlhé časy nabíjania ovplyvniť vlastnosti povrchu a zmeniť hodnotu povrchového odporu.

Doba nabíjania nie je jasne definovaná normou ASTM D-257 a odborníci používajú na meranie materiálov rôzne časy. Výsledkom sú nekonzistentné hodnoty merania.

Modifikovaný prístup

Po preskúmaní údajov z testu ASTM D-257 a následnej analýzy meraní pracovná skupina č. 1 vytvorila upravený

postup na meranie rezistivity statických disipatívnych materiálov. Definovaný postup bol vyvinutý a testovaný na teste zúčastnenými laboratóriami.

Konečná verzia procedúry znížila celkovú odchýlku na odchýlku 1. rádu medzi laboratórnymi laboratóriami alebo istotou menšou ako polovicu rozsahu. To bolo považované vyhovujúce a nový postup bol v konečnom dôsledku uvoľnený asociáciou ESD ako meranie povrchovej odolnosti staticko-disipatívnych plošných materiálov, EOS / ESD S11.11-1993.

Povrchový odpor podľa S11.11

S11.11 definuje postup merania povrchového odporu planárneho (plochého) statického disipatívneho materiálu. Kritické prvky meracieho systému sú:

Návrh elektródového systému a súvisiaceho zariadenia

Návrh konštrukčnej zostavy elektród je založený na sústrednom krúžku Obr.1.

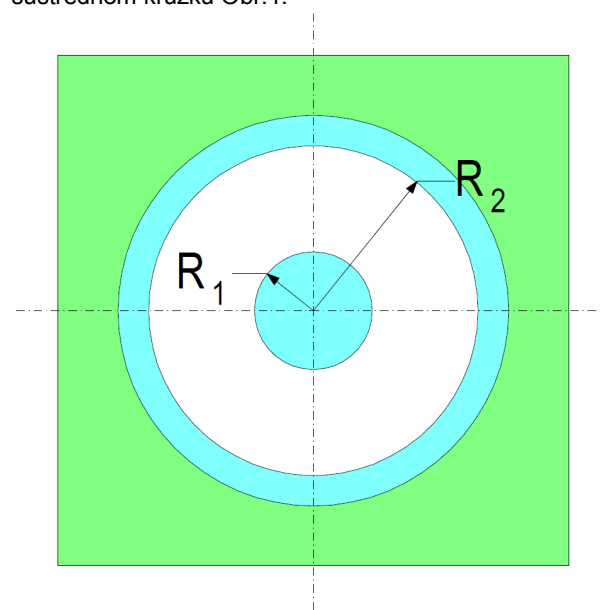


Figure 1. Návrh konštrukčnej zostavy elektród [2]

Súprava elektród S11.11 je definovaná svojou veľkosťou, povrchom materiálu elektródy a celkovou hmotnosťou. Akékoľvek laboratórne meranie povrchovej vodivosti disipatívneho materiálu musí používať rovnakú konfiguráciu.

Kruhové testy ukázali, že povrchový odpor staticky disipatívneho materiálu sa značne menil, ak sa skúšobná vzorka merala na vodivom skúšobnom lôžku. Táto premenná bola eliminovaná špecifikovaním izolátora ako nosnej plochy vzorky.

Prístrojové zariadenie používané na meranie povrchového odporu môže pozostávať buď z napájacieho zdroja a ampérmetra alebo z integrovaného zariadenia, ktoré kombinuje tieto funkcie prístroja. Prístrojové vybavenie sa musí merať od $1,0 \times 10^3$ do $1,0 \times 10^{13} \Omega$ a má skúšobné napätie 10 a 100 V ($\pm 5\%$). Pretože všetky systémy sú odlišné, S11.11 používa dva postupy na overenie a charakterizáciu schopností každého systému.

Overenie systému v oblasti nízkeho odporu

Kritické merania nízkeho povrchového odporu boli eliminované S11.11. Prvou úlohou bolo zabezpečiť, aby zostava elektród dosiahla stály kontakt s testovaným

materiálom pri nízkom napätí (10 V). Druhým cieľom bolo potvrdiť, že celý systém vykonal presné meranie nízkeho odporu ($1,0 \times 10^6 \Omega$) pri 10 V. Ak bola konfigurácia elektród rozdielna alebo testovacie napätie bolo abnormálne nízke, výsledkom bola nepresné meranie.

Pre dosiahnutie presného zarovnania zostavy elektródového systému sa používa presný kalibračný krúžok (zariadenie na meranie materiálu s nízkym povrchovým odporom). Ak je zostava elektród presná a je elektródový systém galvanicky spojený bez ovplyvňujúcich prechodových odporov resp. bez nedokonalého styku s povrchom materiálu a nameraný odpor systému bude v rozsahu $5,0 \times 10^5 \Omega$, $\pm 1\%$ pri 10 V, potom ak je elektródový systém presne umiestnený, otáčanie elektródového systému o 90° opäť zistí odpor $5,0 \times 10^5 \Omega$, $\pm 1\%$.

Overenie systému v oblasti s vysokým odporom

Závislosť medzi vysokým odporom ($1,0 \times 10^{12} \Omega$) a definovaným časom nabíjania bola potvrdená. Každý systém však môže byť odlišný a môže vykázať rozdiely v napájaní, meraní prúdu, kábloch a v pripojeniach elektród. Na posúdenie týchto premenných sa používa zariadenie na overenie systému s vysokou rezistivitou, ktoré overuje presnosť merania systému pri vysokých odporoch.

Kalibračná vzorka má dva krúžky slúžiace ako elektródy, ktoré sa plne dotýkajú povrchu materiálu. Rezistor $1,0 \times 10^{12} \Omega$ ($\pm 5\%$) sa inštaluje medzi vnútorné a vonkajšie krúžky. Táto konfigurácia umožňuje určiť dobu nabíjania systému podľa nasledujúceho postupu:

- zostava elektród je umiestnená na verifikačnom zariadení s horným rozsahom a pripojená k prístroju,
- aplikuje napätie 100 V na elektródový systém overovacieho odporu
- skutočný odpor je definovaný ako horné stabilné meranie odporu systému, ktoré by malo byť $1,0 \times 10^{12} \Omega$ ($\pm 5\%$),
- akonáhle je definované horné stabilné namerané hodnotu odporu, používa sa na určenie doby nabíjania
- 5 časových meraní sa vykonáva v rozsahu 10% merania stabilného odporu,
- 5 nameraných časov nabíjania sa spriemeruje a pridá sa k nim 5 s.

Výsledkom je čas nabíjania pre daný systém. Vypočítaná doba nabíjania umožňuje systému vykonať meranie maximálneho odporu bez nadmerného vystavenia vzorky vysokému napätiu. Doba nabíjania sa používa pre všetky merania odporu väčšie ako $1,0 \times 10^6 \Omega$ a zabezpečuje konzistentnosť merania.

Veľkosť vzorky a predkondicionovanie

S11.11 špecifikuje, že pre merania povrchového odporu musia mať vzorky minimálnu veľkosť $7,6 \times 127$ mm. Vzorky by mali byť o niečo väčšie ako elektródový systém a pri porovnaní rôznych materiálov by mali byť všetky vzorky rovnakej veľkosti.

Pred testovaním sa vzorky kondicionujú počas 48 hodín až 72 hodín pri definovanej teplote a nízkej Rh, tj. 23°C ($\pm 3^\circ \text{C}$) a 12% Rh ($\pm 3\%$ Rh). Meranie vzoriek s rovnakou veľkosťou pri definovanej teplote a Rh ďalej maximalizuje opakovateľnosť a zvyšuje konzistentnosť merania.

Základný postup merania S11.11

Je potrebné merať aspoň šesť vzoriek toho istého materiálu, aby sa dosiahla minimálna úroveň štatistickej spoľahlivosti. Po umiestnení skúšobnej vzorky na

izolovanom skúšobnom lôžku a usporiadaní elektród v jej strede sa na zostavu elektród aplikuje napätie 10 V.

Ak je meraný odpor materiálu po 5 s menší ako $1,0 \times 10^6 \Omega$, zaznamenaná sa. Ak je meraný odpor rovný alebo väčší ako $1,0 \times 10^6 \Omega$, testovacie napätie sa vypne a následne sa použije na opätovné meranie napájacie napätie 100 V. Uvedený odpor, po dokončení merania trvajúceho na základe vypočítanej doby nabíjania systému, sa považuje za povrchový odpor vzorky v ohmoch podľa S11.11.

Odmeria sa všetkých šesť vzoriek a zaznamenajú sa údaje:

- minimálny povrchový odpor všetkých vzoriek,
- maximálny povrchový odpor všetkých vzoriek,
- priemerný povrchový odpor všetkých vzoriek,
- čas kondicionovania,
- relatívna vlhkosť,
- teplota,
- skúšobné napätie,
- čas nabíjania horného odporového rozsahu.

Experiment

Na určenie času nabíjania bol vykonaný experiment určenia povrchového odporu papiera. Ako materiál bol zvolený kancelársky papier s gramážou 80 g / A4.

Bol použitý elektródový systém fy Tettex, ktorý je súčasťou merača kapacity a činiteľa dielektrických strát.

Testovacie napätie bolo získavané z elektrometra Keithley 6517B, ktorý zároveň meral aj prúd tečúci cez povrch skúmaného objektu. Testovacie napätie bolo zvolené vo výške 100 V, čo zodpovedá vyššie uvedeným odporúčaniam.

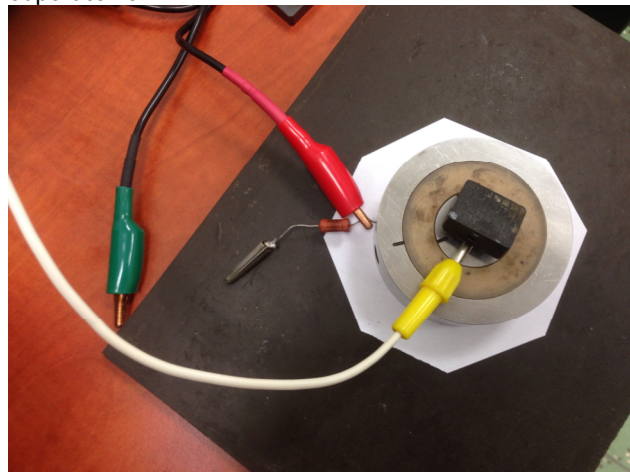


Figure 2. Návrh konštrukčnej zostavy elektród [2]

Pomocou meracieho programového vybavenia bol zaznamenávaný priebeh nabíjacieho prúdu, ktorý zodpovedá procesu nabíjania materiálu.

Na obr. 2 je vidieť celkovú zostavu meracieho systému.

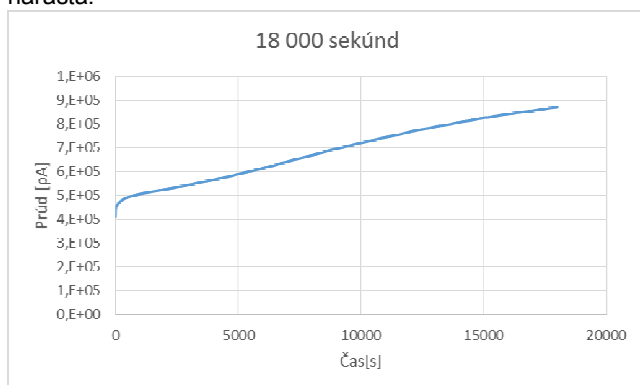
Diskusia

Boli vykonané viaceré merania s tým, že sa predpokladalo dosiahnutie ustáleného stavu povrchového odporu, teda stav, kedy je prúd tečúci medzi elektródami elektródového systému konštantný, resp. dochádza v čase k jeho minimálnej zmene.

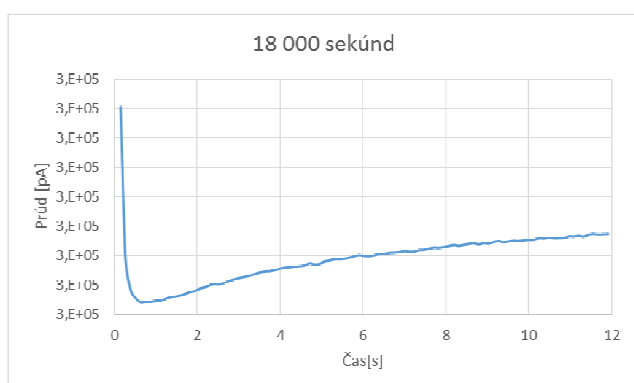
Uvedený stav sa nepodarilo dosiahnuť po dobe nabíjania 18 000 sekúnd. Merania boli niekoľkokrát opakované, vždy s iným objektom, ale výsledok sa nezmenil.

Ako je možné vidieť z priebehu prúdu po dobe 18 000 sekúnd (5 hodín) nedošlo k zmene charakteru približne

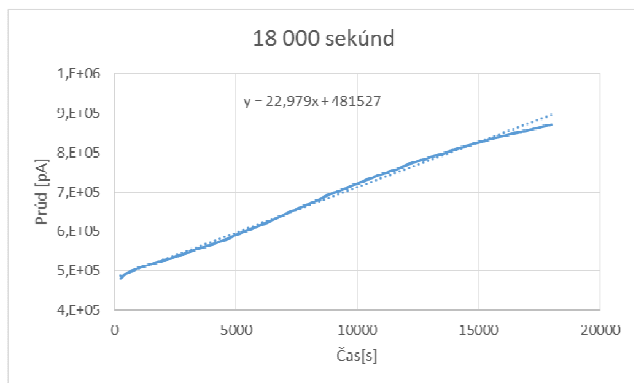
lineárneho stredy na konkávny, ktorý by smeroval k ustálenému stavu a ani na konvexný, ktorý by poukazoval na nárast vodivosti smerujúci k deštrukcii povrchu a trendu k preskoku medzi elektródami. Vodivosť systému lineárne narastá.



Obr.3. Priebeh prúdu v čase do 18 000 sekúnd



Obr.4. Priebeh prúdu do času 12 sekúnd



Obr.5. Priebeh prúdu v čase od 200 sekúnd do 18 000 sekúnd

Ako je z priebehov prúdov možné vidieť, čas potrebný na dobu ustálenia je väčší ako 18 000 sekúnd. Keďže skúmaným materiálom bol štandardný kancelársky papier, na základe jeho fyzikálnych vlastností sa predpokladal vysoký povrchový odpor a teda aj aplikované skúšobné napätia sa zvolilo na úrovni 100 V. Merania však dokázali, že počas merania dochádza k nárastu prúdu a teda bez prítomnosti zdroja je túto skutočnosť možné vysvetliť len postupným uvoľňovaním nosičov náboja v dôsledku rozpadu štruktúry materiálu.

Počiatočná hodnota povrchového odporu je 207 M Ω .

Ďalší smer výskumu sa bude preto orientovať na zistenie zmien v fyzikálnej a chemickej štruktúre materiálu.

Záver

Bol dokázaný jav počiatočného nabíjania povrchu izolácie na báze celulózy. Po počiatočnom poklese

zodpovedajúcom nabíjaniu materiálu došlo následne k uvoľňovaniu ďalších nosičov náboja, pričom táto závislosť je do 18 000 sekúnd lineárna.

Podakovanie

Práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0438 a Ministerstvom školstva v rámci projektov VEGA č. 1/0311/15, a 2/0141/16.

Literatúra

- [1] J. Kim, M. Chaudhury, and M. Owen, "Hydrophobicity loss and recovery of silicone HV insulation", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 6, pp. 695–702, 1999.
- [2] William A. Maryniak, Toshio Uehara, Maciej A. Noras: Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements Using a Concentric Ring Probe Technique Trek Number 1005

Autor: Roman Cimbala, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: roman.cimbala@tuke.sk