

Roman Cimbala, Lukáš Kruželák, Martin Kolek

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

Skúmanie frekvenčných závislostí povrchového odporu

Abstrakt. V úvode sa táto publikácia zaoberá všeobecnými poznatkami o povrchovom odpore a povrchovom mernom odpore. V ďalšej časti je navrhnutý experiment na meranie frekvenčnej závislosti povrchového odporu celulóзовého kancelárskeho papiera. Pri meraní boli zvolené rôzne meracie napätia a široký frekvenčný rozsah, zároveň bol použitý sériový a paralelný model na meranie povrchového odporu. V závere publikácie sú vyhodnotené frekvenčné závislosti povrchového odporu.

Abstract. In the introduction this paper deals with general knowledge of surface resistance and per-unit surface resistance. In the next part, an experiment is proposed to measure the frequency dependence of surface resistance of cellulose paper. Various measurement voltages and a wide frequency range were selected for measurement, while a serial and parallel model for surface resistance measurement was used. At the end of the publication, the frequency resistance of the surface resistance is evaluated.

Kľúčové slová: kancelársky papier, frekvenčná závislosť, povrchová rezistivita, cuprexit.

Keywords: office paper, frequency dependence, surface resistivity, cuprexit.

Úvod

Pri prenose a distribúcii elektrickej energie je jedným z najdôležitejších komponentov izolačný systém elektroenergetických zariadení.

Prenos elektrickej energie je zabezpečený vzdušnými alebo káblovými vonkajšími prenosovými vedeniami. Poveternostné podmienky, životné prostredie a škody spôsobené vtákmi a ľudskou činnosťou majú významný vplyv na izolačný systém vonkajších prenosových vedení. Zmeny počasia sú najväčšou hrozbou pre bezpečnosť prevádzky prenosových liniek, tieto zmeny zahŕňajú hlavne údery blesku, mráz, silný vietor a iný stav klímy, čo môže spôsobiť poškodenie izolácie a zmenu jej dielektrických vlastností. V dnešnej priemyselnej dobe kedy je ovzdušie znečistené exhalátmi je nutné zistiť ako tieto exhaláty vplyvajú na izolačný systém vonkajších prenosových vedení. Keďže exhaláty sa usádzajú na povrchu izolátorov je potrebné detekovať hlavné zmeny povrchového odporu a povrchového merného odporu.

Povrchová rezistivita

Povrchová rezistivita sa vzťahuje na odpor, ktorý sa vyskytuje pri zvodovom prúde pozdĺž povrchu izolačného materiálu. Môže sa tiež definovať ako elektrický odpor, ktorý existuje medzi dvoma paralelnými elektródami, ktoré sa dotýkajú povrchu. Elektródy musia byť oddelené vzdialenosťou rovnajúcou sa dĺžke kontaktov uvedených elektród. Štyri konce elektród tvoria štvorec, preto je odpor vyjadrený v ohmoch a niekedy v ohmoch na meter štvorcový. Povrchová rezistivita sa vypočíta ako podiel potenciálneho gradientu s jednotkami V/m a prúdu na jednotku dĺžky elektród, A/m. Toto je zhrnuté ako pomer poklesu jednosmerného napätia na jednotku dĺžky elektródy na prúd na jednotku šírky. Povrchový odpor určuje vedenie akéhokoľvek daného materiálu. Čím je vyššia povrchová rezistivita, tým nižšia je vodivosť materiálu, pretože bude mať nízky zvodový prúd[1].

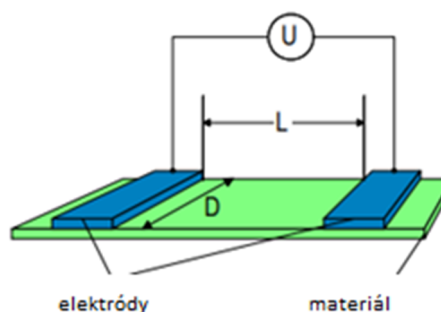
Pojmy povrchového odporu a povrchového merného odporu môžu byť niekedy mätúce. Povrchový odpor, R_s (1), je definovaný ako podiel jednosmerného napätia U k prúdu, I_s prechádza medzi dvoma elektródami so špecifikovanou konfiguráciou, ktoré sú v kontakte s tou istou stranou testovaného materiálu (obr. 1)[1].

$$R_s = \frac{U}{I_s}, \quad (1)$$

Povrchový merný odpor ρ_s , na druhej strane je určený pomerom jednosmerného napätia U poklesom na pomernú jednotku dĺžky L a na povrchový prúd I_s na pomernú jednotku šírky D .

$$\rho_s = \frac{UD}{I_s L}, \quad (2)$$

Povrchový merný odpor je vlastnosť materiálu. Teoreticky by mal zostať konštantný bez ohľadu na spôsob a usporiadanie elektród používaných na meranie povrchového merného odporu. Výsledok merania povrchového odporu závisí od materiálu a geometrie elektród použitých pri meraní[2].



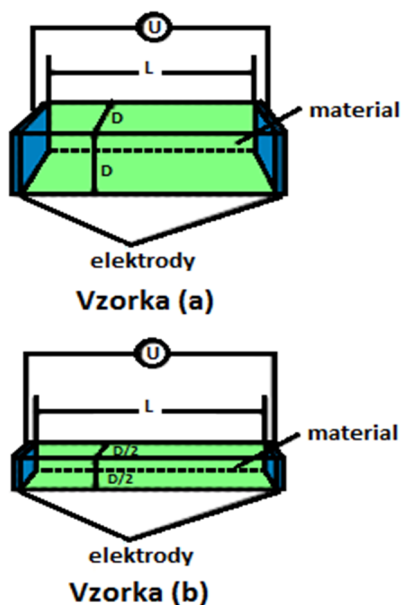
Obr. 1 Základná konfigurácia elektród pre meranie povrchového odporu a povrchového merného odporu[2].

Povrchový merný odpor

Povrchový merný odporsa vzťahuje na prúdy pretekajúce v povrchovej vrstve materiálu. Stanovuje sa nepriamo, meraním povrchového odporu, pri zohľadnení efektívnej dĺžky meracej elektródy a šírky štrbiny medzi elektródami. Toto meranie je náročné najmä z toho dôvodu, že na povrchovú vodivosť vplyva okolité prostredie, čo je obzvlášť dobre vidieť v prípade materiálov s veľmi veľkým merným odporom[2].

Je možné stanoviť vzťah medzi povrchovým odporom a povrchovým merným odporom pre akúkoľvek konfiguráciu elektród. Myšlienka prúdovej hustoty je veľmi užitočná pre

pochopenie tohto vzťahu. Zoberme dve vzorky materiálu ako je znázornené na obrázku 2. S konštantným napätím U a obidve vzorky sú z toho istého materiálu tak bude množstvo prúdu pretekajúceho cez tento materiál iné. Hrubšia vzorka (vzorka (a)) vedie prúd „ľahšie“ ako tenká vzorka (vzorka (b)). Podobne ako vodovodné potrubia – pri konštantnom tlaku vody, bude viac vody za jednotku času prechádzať cez rúrku s väčším priemerom. Hustota prúdu, je množstvo prúdu prechádzajúceho jednotkou plochy vzorky materiálu. Povrchová plocha je kolmá na smer prúdenia prúdu[2].



Obr. 2 Vzorky materiálu s rôznym prierezom[3].

Keď je napätie U udržiavané konštantné, prúdová hustota tenkej a hrubej vzorky je rovnaká. Hustota elektrického prúdu je vyjadrená:

$$J = \frac{I}{S}, \quad (3)$$

kde: I je prúd a S je plocha povrchu[3].

Hustota povrchového prúdu je ďalšou koncepciou užitočnou na pochopenie vzťahu medzi povrchovým odporom a merným povrchovým odporom. Zvážte obrázok 1, kde obe elektródy sú na tej istej strane materiálu. Predpokladá sa, že elektrický prúd prúdi iba na povrchu materiálu. V skutočnosti to nie je úplná pravda. Vždy tam časť prúdu preteká celým materiálom. A však, aby sa umožnilo porovnanie povrchových vlastností rôznych materiálov predpokladá sa, že povrchový prúd preteká nekonečne tenkou povrchovou vrstvou.

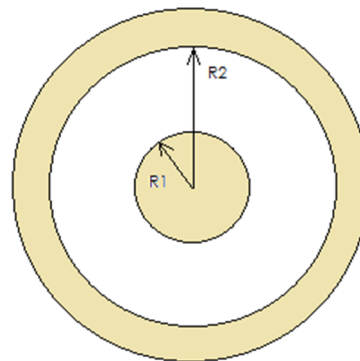
Táto vrstva je taká tenká, že jej hrúbka môže byť zanedbateľná. Povrchová prúdová hustota J_s (4) je preto definovaná ako:

$$J_s = \frac{I}{D}, \quad (4)$$

kde D je šírka elektródy[4].

Vzťah medzi povrchovým odporom a merným povrchovým odporom pre sústredné kruhy môže byť definovaná povrchovou hustotou prúdu v oblasti medzi krúžkami. Vďaka povrchovej hustote prúdu je možné zistiť

intenzitu elektrického prúdu medzi elektródovými krúžkami[4].



Obr. 3 Sústredné kruhové elektródy s rôznym polomerom[4].

Kde R_1 je vonkajší polomer stredovej elektródy a R_2 je vnútorný polomer vonkajšej prstencovej elektródy.

Povrchová hustota prúdu J_s (5) pre sústredné kruhy je určená ako:

$$J_s = \frac{I_s}{2\pi r}, \quad (5)$$

Kde polomer r sa pohybuje od R_1 do R_2 . Je dôležité mať na pamäti, že pri testovaní merného povrchového odporu (alebo merného odporu) akéhokoľvek materiálu sa predpokladá, že všetky prúdy prechádzajú medzi elektródami pozdĺž povrchu a nepreniknú do objemu materiálu. Aby sa zabezpečilo správne meranie povrchových prúdov, vyvinuli sa niektoré pokročilejšie techniky merania merného povrchového odporu. Ohmov zákon popisuje vzťah medzi prúdovou hustotou J (3) a intenzitou elektrického poľa E . To je platné aj pre povrchové prúdy[5]:

$$J_s = \frac{E}{\rho_s}, \quad (6)$$

Vnútorný merný odpor

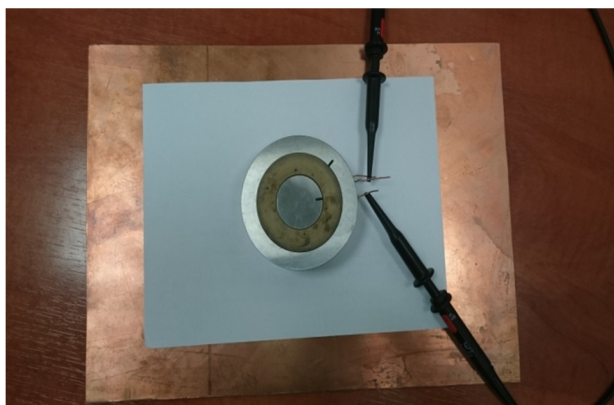
Vnútorný merný odpor sa vzťahuje na prúd pretekajúci vnútorom izolačného materiálu pod vplyvom konštantného elektrického poľa. Stanovuje sa vždy nepriamo, meraním vnútorného odporu, pri zohľadnení efektívnej plochy meracej elektródy a hrúbky vzorky. Merania takéhoto typu nie sú jednoduché najmä vzhľadom na veľmi malé prúdy. Pri určovaní vnútorného merného odporu materiálu treba preto preskúmať veľké množstvo vzoriek a následne vypočítať priemernú hodnotu, obzvlášť ak sa jedná o nehomogénny materiál[5].

Vnútorný merný odpor sa odporúča merať pomocou troch elektród: meracej a ochrannéj na jednej strane dielektrika a napäťovej na druhej strane. Rovnaký počet elektród sa odporúča aj v prípade povrchového merného odporu, tu je však usporiadanie elektród iné. Meracia a napäťová elektróda sa nachádzajú na jednej strane dielektrika, ochranná elektróda na jeho opačnej strane[5].

Návrh experimentu

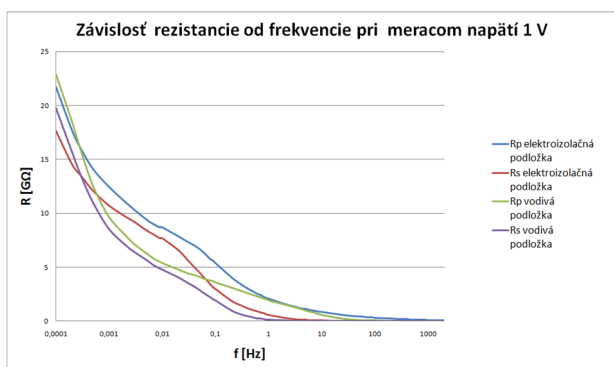
V experimente bol meraný povrchový odpor kancelárskeho papiera s gramážou 80g a formátom A4. Elektródový systém tvorili sústredné kruhové elektródy (Obr. 4), s polomerom $R_1 = 24,5$ mm a $R_2 = 26,5$ mm. Meraná vzorka kancelárskeho papiera, bola umiestnená na jednostrannom cuprextite a to raz z vodivej strany a následne z nevodivej strany, pre porovnanie výsledkov. Na meranie bol použitý prístroj Megger IDAX

300, s frekvenčným rozsahom 0.1 mHz - 10 kHz. Hodnoty povrchového odporu boli merane pri 1, 10 a 100 voltoch, vo frekvenčnom rozsahu ktorý dovoľovala konfigurácia elektród.



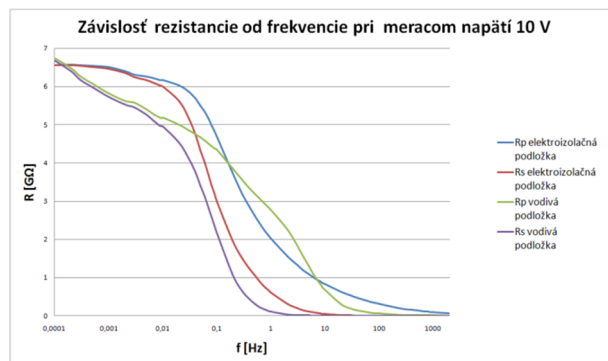
Obr. 4 Umiestnenie elektródového systému, so vzorkou papiera na vodivej strane cuprextitu.

Pre každé napätie boli vykonané viaceré merania, aby sa dosiahol ustálený stav hodnôt povrchového odporu. Zároveň pre každé z meraní, bol použitý sériový a paralelný model merania. Namerané výsledky boli graficky spracované, pre jednoduchšie vyhodnotenie nameraných výsledkov.



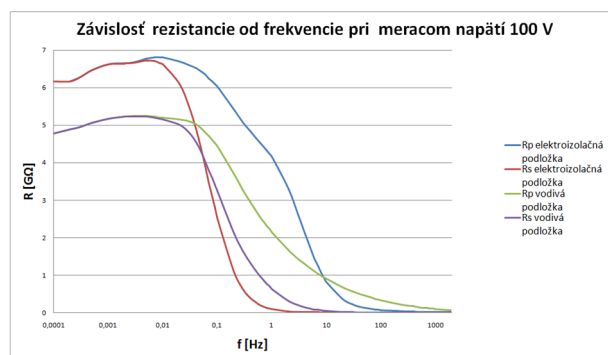
Obr. 5 Grafická závislosť povrchového odporu od frekvencie, pri meracom napätí 1 V.

Na grafických závislostiach boli pozorované priebehy povrchového odporu, v závislosti na frekvencii. Pri meracom napätí 1 volt je pozorovaná oveľa vyššia hodnota povrchového odporu, než pri meracom napätí 10 a 100 V. Je to spôsobené veľmi malým meracím napätím, pri ktorom cez vzorku kancelárskeho papiera, pretekajú veľmi malé prúdy. Vo frekvenčnom pásme od 1 Hz - 0,5 mHz je pozorované zníženie povrchového odporu, pri vzorke umiestnenej na vodivej strane cuprextitu. Pri frekvenciách nižších ako 0,5 mHz sa na hodnotách povrchového odporu viac prejavil použitý merací model. Hodnoty odporu sú vyššie pri použití paralelného modelu, než pri sériovom modeli. Tieto rozdiely sú spôsobené tým, že pri sériovom modeli sa prejavuje len odpor povrchu kancelárskeho papiera, no pri paralelnom modeli sa prejaví aj odpor v priereze kancelárskeho papiera.



Obr. 6 Grafická závislosť povrchového odporu od frekvencie, pri meracom napätí 10 V.

V hodnote meracieho napätia 10 voltov, je pozorovaná znížená hodnota povrchového odporu kancelárskeho papiera, oproti meraciemu napätiu s hodnotou 1V. Pri analýze výsledkov je pozorovaný vplyv vodivej časti cuprextitu, a to hlavne vo frekvenčnej oblasti 0,1 mHz - 10 mHz. Pri nevodivej ploche cuprextitu je pozorovaný vyšší povrchový odpor, než pri vodivej ploche. Vo frekvenčnom pásme 10 mHz - 50 Hz sa však viac prejavil vplyv použitého meracieho modelu. Hodnota povrchového odporu pri aplikovaní paralelného meracieho modelu, je v tejto oblasti výrazne vyššia, než u sériového modelu.



Obr. 7 Grafická závislosť povrchového odporu od frekvencie, pri meracom napätí 100 V.

Pri hodnote meracieho napätia 100 voltov, tak ako aj pri meracom napätí 10 V je pozorovaná znížená hodnota povrchového odporu papiera, vzhľadom k meraciemu napätiu s hodnotou 1V. Je viditeľný vplyv vodivej časti cuprextitu vo frekvenčnej oblasti 0,1 mHz - 10 mHz. Zároveň je pozorovaný pokles povrchového odporu pri znižujúcej sa frekvencii, tento pokles je pravdepodobne spôsobený polarizáciou vzorky. Aj pri tomto napätí sa vo frekvenčnom pásme 10 mHz - 50 Hz viac prejavil vplyv použitého meracieho modelu.

Diskusia

Pri vykonávaní testov povrchového odporu a merného povrchového odporu je dôležité zvážiť niektoré dodatočné komponenty ovplyvňujúce výsledky testu. Elektrický odpor každého nevodiveho materiálu závisí od mnohých environmentálnych faktorov. Môže sa meniť vlhkosťou, teplotou atď. Ďalším dôležitým aspektom je zabezpečiť dobrý kontakt medzi elektródami a testovaným materiálom. Systémy elektród môžu byť vyrobené z rôznych materiálov, v rôznych tvaroch a konfiguráciách. Spôsob zapojenia (kontaktu) elektród k materiálu má veľmi dôležitý vplyv na výsledok merania. Úroveň napätia používaného počas

testovania je tiež veľmi dôležitá. Zvyčajne odpor materiálu je závislý od hodnoty aplikovaného napätia a časového rozpätia, počas ktorého bola vzorka napájaná (pod napätím).

Celulózový kancelársky papier je materiál s veľmi vysokým odporom, preto pri priložení meracieho napätia 1 V bola hodnota povrchového odporu niekoľko krát vyššia než pri aplikácii väčších napätí. Tento nárast povrchového odporu je zapríčinený veľmi malým prúdom pretekajúcim po povrchu materiálu a cez jeho prierez. Preto je vhodné použiť vyššie napätie. Výrazný vplyv na namerané výsledky má aj frekvencia. V oblasti veľmi nízkych frekvencií, kedy priebeh jednej periódy trvá od niekoľko sekúnd, až po desiatky minút, sa priložené meracie napätie správa ako jednosmerné. Toto napätie má veľmi pomalý nábeh na maximálnu hodnotu. Tento pomalý nárast sa prejaví zvýšením povrchového odporu. Naopak pri vyšších frekvenciách sa povrchový odpor znižuje, až na hraničnú hodnotu.

Na meranie mal výrazný vplyv aj použitý model merania, keďže kancelársky papier má veľmi vysoký odpor, je vhodnejšie použiť paralelný model merania, ktorý je vhodnejší pre meranie materiálov s vysokým odporom.

Záver

V experimente bol meraný povrchový odpor celulózového kancelárskeho papiera. Pri meraní boli použité sústredné kruhové elektródy a ako podklad pod vzorku kancelárskeho papiera bol použitý cuprextit. Hlavným cieľom tohto experimentu bolo meranie povrchového odporu v závislosti na frekvencii a zistenie, aký vplyv má vodivá a nevodivá strana cuprextitu na meranie. Zároveň sme skúmali vplyv veľkosti meracieho napätia na hodnotu povrchového odporu pri paralelnom a sériovom meracom modeli. Z nameraných výsledkov vyplýva, že povrchový odpor je v oblasti nízkych frekvencií závislý na použitom meracom modeli, a vo vyšších frekvenciách na použitej podložke pod meranou vzorkou. Zároveň je meraný povrchový odpor závislý na priloženom meracom napätí, pri použití príliš malého napätia sú hodnoty povrchového odporu oveľa vyššie, než pri použití väčšej hodnoty napätie.

PodĎakovanie

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] Mentlik, V.: *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatúra, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [2] Clingerman M. L., King J. A., Schulz K. H., Meyers J. D.: *Evaluation of Electrical Conductivity Models for Conductive Polymer Composites*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 83, 1341–1356 (2002), © 2002 John Wiley & Sons,
- [3] Mentlik, V.: *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Ediční středisko ZČU, 1995. ISBN 80-7082-227-9.
- [4] ČSN IEC 93 (346460): *Skúšky tuhých elektroizolačných materiálov. Metódy merania vnútornej resistivity a povrchovej resistivity tuhých elektroizolačných materiálov*. 2. Bratislava: VÚKI Bratislava, a. s., 1993.
- [5] Solymar, L., Walsh, D. *Electrical properties of materials*. Oxford university press, 8. vydanie, 2010, ISBN 978-0-19-956592-4.

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

Lukáš Kruželák, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: lukas.kruzelak@tuke.sk

Martin Kolek, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: martin.kolek@student.tuke.sk