

Bystrík Dolník, Pavol Virba

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

Možnosti použitia štvorbodovej metódy na stanovenie povrchovej vodivosti izolačných materiálov

Abstrakt. Starnutie izolačných materiálov používaných v elektrotechnike má podstatný vplyv na životnosť elektrického zariadenia. Príspevok je zameraný na možnosti použitia štvorbodovej meracej metódy pre stanovenie povrchovej vodivosti izolačných materiálov. Ďalej sú uvedené niektoré zdroje rušenia a spôsoby ich eliminácie.

Abstract. Aging of insulating materials used in electrical engineering has a significant impact on the lifetime of electrical equipment. The paper is focused on the possibility of using four point probe measurement method for the determination of conductivity of insulating materials. The paper presents some possible sources of interference and methods for their elimination.

Kľúčové slová: dielektrikum, vodivosť, rezistivita, meracia metóda, Van der Pauw.

Keywords: dielectric, conductivity, resistivity, measurement method, Van der Pauw.

Úvod

Všetky materiály vo väčšej alebo menšej miere vedú elektrický prúd; zároveň všetky materiály majú v dostatočne silnom elektrickom poli limitovanú elektrickú pevnosť. Podľa elektrickej vodivosti možno materiály klasifikovať na vodiče, polovodiče a nevodiče (izolanty). Pri nízkych intenzitách elektrického poľa je elektrická vodivosť väčšiny materiálov ohmická. Pri vyšších intenzitách elektrického poľa je vodivosť zvyčajne závislá na elektrickom poli a v prípade, že intenzita elektrického poľa ďalej narastá, prebehne deštruktívna forma vodivosti, ktorá je nevratná. V pevných dielektrických obvykle vznikne trvale poškodená dráha po výboji bez ohľadu, či prierazný výboj vznikol dôsledkom tepelnej nestability, alebo dôsledkom iných príčin.

Schopnosť dielektrika viesť elektrický prúd po priložení napätia nazývame vodivosť dielektrika. Jeho recipročná hodnota je elektrický odpor dielektrika. Vodivosť dielektrika je elektrická vlastnosť dielektrika podmienená prítomnosťou voľných nosičov elektrického náboja. Tieto sa účinkom elektrického poľa pohybujú, čo sa prejavuje vo vonkajšom elektrickom obvode ako elektrický prúd.

Pre dielektriká i pre všetky materiály je elektrická vodivosť vyjadrená kvantitatívne mernou elektrickou vodivosťou (konduktivitou) dielektrika alebo merným elektrickým odporom (rezistivitou) dielektrika, t.j. jej recipročnou hodnotou. Merná elektrická vodivosť je tenzorová veličina γ definovaná vzťahom:

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}, \quad (1)$$

kde: \mathbf{J} – hustota elektrického prúdu a \mathbf{E} – intenzita elektrického poľa. Vo vákuu a v dokonalom dielektriku je nulová a v supravodiči nekonečne vysoká. Pokiaľ sa nezdôrazňuje jej frekvenčná závislosť, mernou elektrickou vodivosťou sa rozumie stacionárna vodivosť. V izotropnom prípade je stacionárna elektrická vodivosť reálnou kladnou skalárnou veličinou.

Vo vysokofrekvenčnom elektromagnetickom poli je vhodné považovať mernú elektrickú vodivosť za komplexnú veličinu. Reálna zložka mernej elektrickej vodivosti určuje objemovú hodnotu Joulových strát vo vodiči.

Pre homogénnu vodivú vzorku konštantného prierezu plochy S , ktorou preteká elektrický prúd I s elektrickým napätím U medzi dvoma napäťovými kontaktmi vo vzdialenosti l v smere elektrického prúdu, je merná elektrická vodivosť γ daná vzťahom

$$\gamma = \frac{I}{U} \frac{l}{S}. \quad (2)$$

Voľnými nosičmi, náboja v izolante sú najčastejšie ióny – hovoríme o elektrónovej a iónovej vodivosti v izolantoch. V elektrickom poli tečie prúd nielen cez objem dielektrika (merný vnútorný (objemový) odpor dielektrika), ale aj po jeho povrchu (merný povrchový odpor dielektrika). Vodivosť dielektrika je tým väčšia, čím vyššia je koncentrácia nosičov náboja n a čím väčšia je pohyblivosť nosičov elektrického náboja μ . Pohyblivosť nosičov elektrického náboja je tenzorová veličina v lineárnom vzťahu

$$\mathbf{v} = \mu \mathbf{E}, \quad (3)$$

medzi strednou hodnotou rýchlosti nosičov \mathbf{v} a intenzitou elektrického poľa \mathbf{E} . Závisí od detailov rozptylu nosičov vo vodičoch, od rozličných štruktúrnych defektov a od termálnych kmitov atómov vodiča. Pri jej teoretickom určovaní treba rešpektovať zákonitosti štatistickej fyziky a kvantovej mechaniky. V izotropných vodičoch sa pohyblivosť nosičov redukuje na skalár. Ak n je koncentrácia nosičov a Q ich náboj, merná elektrická vodivosť súvisiaca s transportom týchto nosičov je:

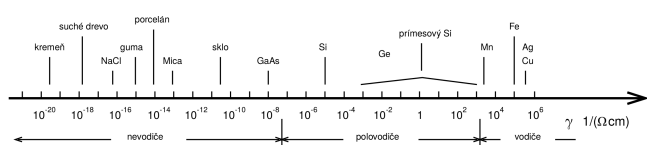
$$\gamma = nQ\mu. \quad (4)$$

Po priložení napätia na dielektrikum opatrené vodivými elektródami sa prúd tečúci cez dielektrikum znižuje s pribúdajúcim časom priloženého napätia a asymptoticky sa približuje ustálenej hodnote. Ak po dosiahnutí ustálenej hodnoty prúdu napätie odpojíme a elektródy skratujeme cez merací prístroj, zistíme, že tečie prúd opačného smeru, ktorého veľkosť klesá asymptoticky k nule. Ustálená hodnota prúdu je dôsledkom pohybu voľných nosičov elektrického náboja a predstavuje elektrickú vodivosť.

Sprevádzajúce premenné zložky prúdu, tzv. nabíjacie a vybíjacie prúdy, súvisia s polarizačnými (absorpčnými) dejmi v dielektriku a sú spôsobené pohybom viazaných nosičov náboja v dielektriku. Aby meranie mernej elektrickej vodivosti dielektrika nebolo ovplyvnené vybíjaním statického elektrického náboja, ktorý vznikol na povrchu vzorky dielektrika a na elektródach dotykom alebo trením pri zhotovení elektród a pri manipulácii so vzorkou, ešte pred priložením napätia treba elektródy skratovať. Prúd tečúci obvodom po takomto skratovaní elektród sa nazýva deelektrizačný prúd [1], [2].

Materiály s nízkou vodivosťou

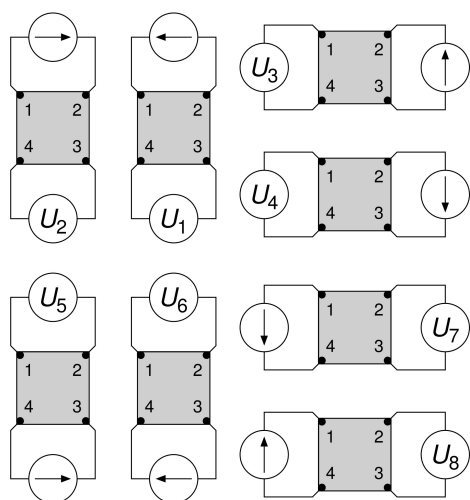
Vodivosť γ rôznych materiálov, pri izbovej teplote, je v rozsahu viac ako 25 rádov, pozri obr. 1. Okrem toho, ak sa ešte vezme do úvahy vodivosť supravodičov meraná pri nízkych teplotách, potom sa tento rozsah rozšíri na 40 rádov (odhadovaná vodivosť supravodičov $10^{20} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$). To je doposiaľ najväčší známy rozsah fyzikálnej vlastnosti.



Obr. 1 Použitie diferenčnej metódy [3]

Pomocou digitálneho multimetra možno merať odpor do stoviek M Ω . V niektorých prípadoch treba pomerne presne merať odpory rádo vo tisíce M Ω , napr. rezistory s extrémne veľkým odporom, stanovenie izolačného odporu izolačných materiálov, príp. výpočtom stanoviť konduktivitu alebo rezistivitu materiálov. Tieto merania treba urobiť pomocou elektrometra, ktorý je veľmi citlivý na meranie extrémne nízkych elektrických prúdov alebo na elektrostatické meranie napätia. Použitím elektrometra možno merať odpory až $10^{18} \Omega$ podľa použitej meracej metódy.

Jedna metóda je založená na princípe priloženia definovaného napätia na vzorku pomocou zdroja napätia a meria sa prúd tečúci vzorkou (meracím obvodom), druhý spôsob využíva zdroj prúdu so známou hodnotou prúdu v meracom obvode a meria sa napätie na vzorke. Okrem vhodnej voľby meracej metódy a prístrojov, treba často použiť špeciálne techniky, ako je tienenie a zemnenie, s cieľom minimalizovať unikajúci prúd, šum a iné nežiaduce účinky, ktoré môžu zhoršiť presnosť merania. Typický príklad pre metódu konštantným napätím je meranie rezistancie jednobrán. Merania sú závislé od veľkosti priloženého napätia (rezistory s vysokou rezistenciou) a od času, počas ktorého je napätie priložené na vzorku (zvod izolantov). Iný príklad je napr. meranie izolačného odporu izolácie elektrických zariadení alebo stanovenie merného elektrického odporu (povrchový, objemový).



Obr. 2. Usporiadanie merania na upravených vzorkách [4]

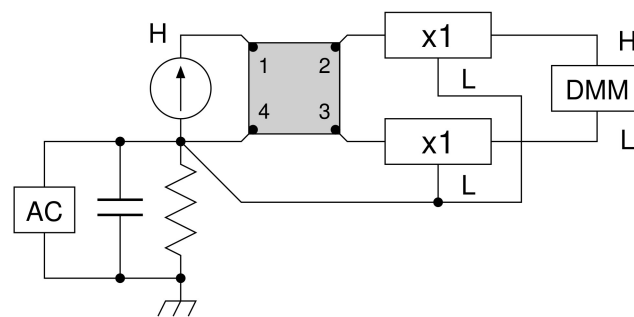
Metóda konštantným prúdom má limity pri meraní na jednobránach (rezistencia do $10^{14} \Omega$). Vnútny odpor voltmetra musí byť aspoň 100-násobne väčší ako je rezistencia (predpokladaná) meranej vzorky. Metóda konštantným prúdom sa používa pre stanovenie rezistancie pomocou štvorbodovej metódy, alebo pomocou metódy Van der Pauw. Tieto metódy (metóda konštantným prúdom) sa poväčšine používajú na materiáloch s polovodičnými

vlastnosťami. Štvorbodová metóda využíva pri meraní kolíneárne usporiadanie štyroch meracích elektród, ktoré sú v kontakte s meranou vzorkou v jej strede [4].

Metóda Van der Pauw

Jedná sa o metódu konštantným prúdom. Metóda využíva štyri izolované kontakty na hranách ľubovoľne tvarovanej plochej vzorky. Celkovo treba vykonať osem meraní. Postup merania je znázornený na obr. 2. Namerané veličiny sú vzájomne kombinované čím možno, pri známej hrúbke vzorky, numerickým výpočtom stanoviť priemernú hodnotu rezistancie vzorky. Táto metóda je obzvlášť výhodná pre malé vzorky, pretože rozmery vzorky a vzdialenosť kontaktov nie sú dôležité. Dôležité je, aby plochy vzorky boli planoparalelné a aby kontakty na hranách vzorky boli čo najmenšieho rozmeru.

Keď rezistencia meranej vzorky je rádo vo porovnateľná s vnútorným odporom použitého voltmetra, potom treba použiť diferenčné meranie napätia na vzorke podľa obr. 3. Van der Pauw metóda má ďalšie využitie pri meraní Hallovhovho javu, resp. pri stanovení pohyblivosti nosičov náboja a pri stanovení koncentrácie nosičov náboja. V tomto prípade sa odporúča použiť osvedčené tvary pripravených vzoriek [3], [4].

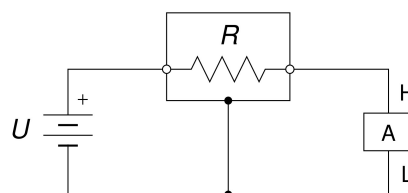


Obr. 3 Použitie diferenčnej metódy [4]

Spôsoby znižovania zdrojov chýb merania

Ako už bolo spomenuté, stanovenie merného elektrického odporu materiálov s nízkou konduktivitou je spojené s možnými zdrojmi rušenia. Patria sem hlavne rušenie elektrickými poľami, akumulácia náboja na meranej vzorke, unikajúce prúdy a fyzikálne javy pôsobiace na meranú vzorku ako napr. piezoelektrický jav.

K elektrostatickému rušeniu dochádza, ak sa elektricky nabitý objekt nachádza blízko nenabitého objektu. Zvyčajne účinky rušenia nie sú výrazné, keď sa náboj pomerne rýchlo rozptýli cez nízku impedanciu. Materiály s vysokou rezistenciou neumožňujú rýchle rozptýlenie náboja, čo má za následok vznik chýb merania. Tieto chybné hodnoty môžu byť spôsobené buď jednosmerným, alebo striedavým elektrickým poľom. Na elimináciu vplyvu elektrických polí možno použiť elektrostatické tienenie. Príklad použitia tienenia je znázornený na obr. 4. Tienenie musí byť vyrobené z dobre vodivého materiálu a treba ho vždy spojiť blízko vstupu meracieho prístroja. Ako tienenie môže byť použitá kovová skrinka alebo sieť z vodičov. Rozmery tienenia treba prispôsobiť veľkosti meranej vzorky. Podobne treba tieniť meracie vodiče.



Obr. 4 Tienenie meranej vzorky s vysokou rezistivitou [4]

Ďalším zdrojom rušenia a tým aj zdrojom chýb sú unikajúce (zvodové) prúdy. Na elimináciu unikajúcich prúdov treba použiť kvalitné izolačné materiály, odstrániť vlhkosť a použiť vhodný spôsob zemnenia. Izolačný odpor meracích vodičov a príslušenstva musí byť o niekoľko rádov vyšší ako odpor meranej vzorky. Medzi vhodné izolačné materiály patrí napr. teflón a polyetylén. Triboelektrické nabíjanie možno eliminovať použitím vodivých pást a odstránením zdrojov vibrácií. Piezoelektrické prúdy sú generované pri mechanickom namáhaní niektorých izolačných materiálov. Niektoré materiály, ktoré majú túto vlastnosť obsahujú kryštalické materiály ako je kremeň, rôzne keramiky a niektoré plasty. Na elimináciu piezoelektrických prúdov treba znížiť mechanické namáhanie a použiť izolačné materiály, ktoré majú nízky piezoelektrický účinok [4].

Záver

Meranie veľkých odporov je pomerne náročné. Použitím vhodnej meracej metódy možno dosiahnuť dostatočne presné hodnoty meraných veličín. Pre tento účel sa používa buď metóda konštantného napätia alebo metóda konštantného prúdu. Navyše treba poznať zdroje rušenia, ktoré zvyšujú chybu merania a následne urobiť opatrenia na ich odstránenie.

Pre účel merania na izolačných materiáloch bol skonštruovaný merací prípravok na meranie povrchovej vodivosti tenkých fólií pomocou metódy konštantného prúdu. Jedná sa o metódu Van der Pauw. Vzorka je umiestnená medzi štyrmi podstavcami, ktoré sú pohyblivo uložené na izolovanom podstavci. Vzorka je mechanicky pritlačená na podstavcoch elektródami pružinou s cieľom znížiť prechodový odpor. Merací prípravok je umiestnený v uzemnenej klietke z dobre vodivého pletiva. Merací prípravok je spojený s meracími prístrojmi pomocou koaxiálnych káblov. Prípravok je potrebné najprv otestovať, či spĺňa požiadavky kladené pri tomto type merania

Literatúra

- [1] Haňka, L. Teorie elektromagnetického pole. SNTL/ALFA, Praha/Bratislava 1975.
- [2] Solymar, L., Walsh, D. Electrical properties of materials. Oxford university press, 8. vydanie, 2010, ISBN 978-0-19-956592-4.
- [3] Czichos, H., Saito, T., Smith, L. Springer Handbook of Materials Measurement Methods. Springer, 2006. ISBN 3-540-20785-6.
- [4] High Resistance Measurements, Application Note 312, Keithley Instruments, 2005.

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

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

Pavol Virba, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektro-techniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: pavol.virba@gmail.com