

*przenikalność elektryczna,
błąd wyznaczenia,
zestaw trójelektrodowy*

Piotr MADEJ*

BŁĄD OD BRAKU PRZYLEGANIA PRZY WYZNACZANIU PRZENIKALNOŚCI ELEKTRYCZNEJ W ZESTAWIE TRÓJELEKTRODOWYM

Przenikalność elektryczną materiału dielektrycznego bada się przy małych częstotliwościach m.in. w zestawie trzech elektrod, stosowanym przede wszystkim do badania rezystywności materiału. Próbką materiału ma zazwyczaj postać arkusika cienkiej folii. Niecałkowity kontakt powierzchni folii z elektrodami jest przyczyną błędów wyznaczenia przenikalności. W opracowaniu przedstawiono analizę wpływu m.in. grubości folii oraz wartości przenikalności na ten błąd.

1. ZESTAW TRÓJELEKTRODOWY

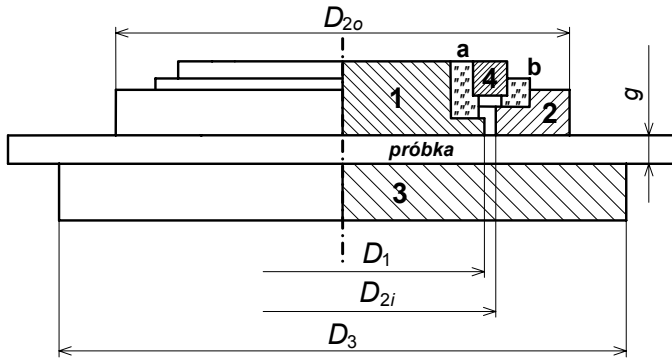
W badaniach właściwości materiałowych popularnym narzędziem jest tzw. zestaw trójelektrodowy ([1, 2, 3, 4]), zaprojektowany głównie do pomiaru rezystancji skrośnej i powierzchniowej próbki, z których następnie oblicza się parametry materiału izolacyjnego – jego rezystywności. W wersji podstawowej [1] składa się on z trzech okrągłych metalowych elektrod – przykład na rys. 1 wg [4]:

- a) elektroda nr 1 o stałym przeznaczeniu – prądowa, środkowa na górze,
- b) elektroda nr 2 dwufunkcyjna, w postaci tzw. pierścienia ochronnego na górze – ochronna przy pomiarze wielkości skrośnych (prądu i rezystancji) a napięciowa przy pomiarze wielkości powierzchniowych,
- c) elektroda nr 3 dwufunkcyjna, na dole – napięciowa przy pomiarze wielkości skrośnych a ochronna przy pomiarze wielkości powierzchniowych.

Wersja zaawansowana zestawu [4] posiada dodatkowy czwarty element metalowy, tzw. pierścień ekranujący (nr 4 na rys. 1), którego zadaniem jest wyeliminowa-

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-372 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 19, e-mail: piotr.madej@pwr.wroc.pl

nie przepływu prądu upływu przez izolację własną zestawu, przez elementy a i b, między elektrodą nr 1 i elektrodą nr 2 w trakcie pomiaru wielkości powierzchniowych.



Rys. 1. Szkic zestawu pomiarowego; elektrody 1, 2, 3 z pierścieniami izolującymi a, b i dodatkowym pierścieniem ekranującym 4

Fig. 1. Idea of the test set; electrodes 1, 2, 3 with isolating rings a, b and additional shielding ring 4

Przedstawiony zestaw elektrod stosuje się do pomiarów właściwości próbek materiałów izolacyjnych przy stałym napięciu a następnie obliczenia parametrów materiałowych. Wygodna jest możliwość jego wykorzystania także do zmierzenia pojemności próbki przy przemiennym napięciu i obliczenia na tej podstawie przenikalności elektrycznej. Częstotliwość sygnału nie może być zbyt duża, ze względu na inne priorytety przy konstrukcji elektrod. Uznano, że w zakresie do około 10 kHz tego typu elektrody nie powinny wprowadzić znaczących, w porównaniu z innymi, błędów częstotliwościowych. Dla porównania podobny do opisywanego zestaw do wyznaczania przenikalności, o średnicy $D_1 = 25\text{--}60$ mm, w wersji bez pierścieni ochronnego i ekranującego [5] lub tylko bez pierścienia ekranującego [6] jest stosowany wraz z miernikiem dobroci, mostkiem lub miernikiem RLC do wyznaczania przenikalności przy znacznie większych częstotliwościach, nawet rzędu kilku–kilkudziesięciu megaherców. Zestaw [5, 6] ma natomiast poważną wadę – ma sztywne prowadzenie w jednej osi; jedna okrągła stała elektroda, druga także okrągła o tej samej średnicy, przemieszczana wzdłuż tej samej osi. Przesunięcie osi o zaledwie $1/3$ minuty kątowej da w takim zestawie szczelinę powietrzną dochodzącą do $2,4\text{--}5,8$ μm , co w przypadku próbek foliowych o grubości $50\text{--}100$ μm jest już dużą wartością. W prezentowanym na rys. 1 zestawie elektrody 1 i 2 są mocowane z niewielkim luzem, pozwalającym na dostosowanie się ich obu do powierzchni próbki [4]. Likwiduje to błędy spowodowane nierównoległością powierzchni próbki ale zwiększa niedokładność wymiaru szczeliny między tymi elektrodami, z czym należy się liczyć przy badaniu rezystywności powierzchniowej.

2. ZASTOSOWANIE ZESTAWU DO WYZNACZENIA PRZENIKALNOŚCI

Przy wyznaczaniu przenikalności materiału na podstawie badania w zestawie trój-elektrodowym jego próbki z cienkiej folii o grubości niekiedy setek μm , najczęściej rzędu 100 μm i mniej, nawet niewielkie niedoskonałości kontaktu powierzchni folii z elektrodami dają błędy, intuicyjnie tym większe, im mniejsza jest grubość próbki.

Prowadzić to może między innymi do niepełnego spełniania przez pierścień ochronny 2 swej funkcji. Niemniej przy cienkiej próbce materiału, o znacznie mniejszej grubości g od szerokości szczeliny $1/2(D_{2i} - D_1)$ między elektrodą prądową 1 i elektrodą ochronną 2 nie jest to problem aż takiej wagi jak przy badaniu rezystancji skrośnej przy prądzie stałym, gdy ten pierścień ma przejąć prądy powierzchniowe.

Rozważono pierwszoplanowe problemy, podzielone sztucznie na trzy grupy, mimo, że przyczyna jest ta sama – niedoskonały kontakt próbka-elektrody. Te problemy występują także przy badaniu prądem stałym, np. przy pomiarze rezystancji skrośnej;

- a) niepełny kontakt na powierzchni próbka-elektroda 1, parametr a – stosunek rzeczywistej do teoretycznej powierzchni kontaktu z elektrodą,
- b) powstanie szczeliny wypełnionej powietrzem tam, gdzie brak kontaktu, o grubości zależnej od jakości próbki i elektrod, parametr b – stosunek średniej szczeliny powietrznej do odległości między elektrodami,
- c) wydłużona droga przepływu prądu przez materiał wskutek częściowego niepokrywania się obszarów dobrego kontaktu przy obu elektrodach.

W przypadku badania próbki przy prądzie przemiennym, celem wyznaczenie przenikalności, punkt c) może być pominięty. Można to zrobić ze względu na znacznie mniejszą różnicę przy prądzie przemiennym o częstotliwości np. 1 kHz we właściwościach materiału izolacyjnego o ε_r rzędu kilka a powietrzem o $\varepsilon_r \approx 1$. Problem dodatkowy to powstanie obszarów dwu i trójwarstwowego dielektryka w miejscach braku bezpośredniego kontaktu próbka-elektrody, co może skutkować uzależnieniem zastępczej przenikalności od częstotliwości. Nie to jest jednak przedmiotem rozważań. Pytanie; czy można uprościć analizę, przyjmując ogólny model wyłącznie dwuwarstwowy? Na ile duży błąd popełni się w tym przypadku? Analiza wykonana przy założeniu, że stratność powietrznej szczeliny można pominąć, a stratność materiału jest niewielka, na poziomie dobrych dielektryków polimerowych wykazała, że można w praktyce wykonać przeliczenia jak dla bezstratnych pojemności, pod warunkiem jednak, że niedokładność wyznaczenia stratności materiału nie jest przedmiotem rozważań.

2.1. OSZACOWANIE BŁĘDÓW OD NIEDOSKONAŁEGO KONTAKTU

Szczelinę powietrzną można sprowadzić do jednego obszaru przyelektrodowego, oznaczając jej zastępczą, średnią grubość przez g_p , a całkowitą odległość między elektrodami jako g , jak na rys. 1. Wprowadzony wyżej parametr b jest więc równy:

$$b = \frac{g_p}{g}, \quad (1)$$

a całkowita, zmierzona pojemność zastępcza obszaru międzyelektrodowego z włożoną próbką

$$C_m = \frac{\pi D_1^2}{4} \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_r}{g} \left[a + \frac{1-a}{1+b(\varepsilon_r-1)} \right]. \quad (2)$$

W przypadku pomiarów precyzyjnych należy w zależności (2) uwzględnić wartość względnej przenikalności powietrza, w normalnych warunkach większej od jedności o 0,053%, a także większą nieco od $\pi D_1^2/4$ powierzchnię skuteczną elektrody nr 1. Gdyby pomiar był idealny, w nawiasie kwadratowym zależności (2) byłaby wartość 1. W rzeczywistości przy obliczaniu względnej przenikalności elektrycznej materiału ε_{rm} ze zmierzonej pojemności C_m popełni się błąd, którego dobrym wskaźnikiem jest stosunek obliczonej do rzeczywistej przenikalności materiału

$$\frac{\varepsilon_{rm}}{\varepsilon_r} = a + \frac{1-a}{1+b(\varepsilon_r-1)} \quad (3)$$

i odpowiedni błąd względny wyznaczenia przenikalności materiału próbki jest opisany zależnością:

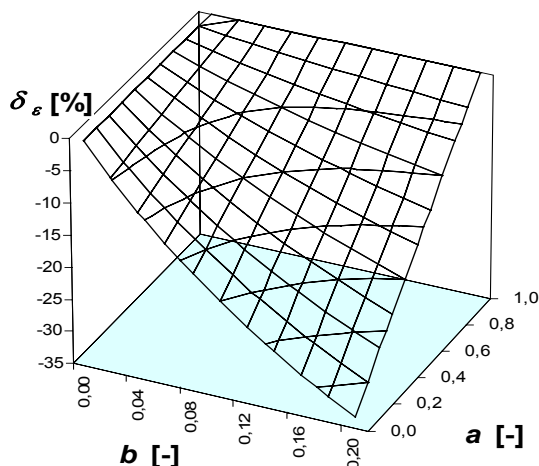
$$\delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{rm}}{\varepsilon_r} - 1 = \frac{a-1}{1 + \frac{1}{b(\varepsilon_r-1)}}. \quad (4)$$

Na przestrzennym rys. 2 przedstawiono zmienność wartości błędu według zależności (4) w postaci powierzchni, przy czym dotyczy to przypadku $\varepsilon_r = 3,5$. Dla wartości $\varepsilon_r = 2$ błędy będą około 2 razy mniejsze, ale dla $\varepsilon_r = 5$ będą większe około 1,3 razy.

Analiza czułości błędu z (4) na zmiany poszczególnych wpływowych wielkości daje podstawy do przewidywania ich interakcji w wynikowym błędzie. Przedstawiono w zależnościach niżej czułości bezwzględne (5) i względne (6) błędu:

$$\frac{d\delta}{da} = \frac{b(\varepsilon_r-1)}{1+b(\varepsilon_r-1)}, \quad \frac{d\delta}{db} = \frac{(a-1)(\varepsilon_r-1)}{[1+b(\varepsilon_r-1)]^2}, \quad \frac{d\delta}{d\varepsilon_r} = \frac{b(a-1)}{[1+b(\varepsilon_r-1)]^2}, \quad (5)$$

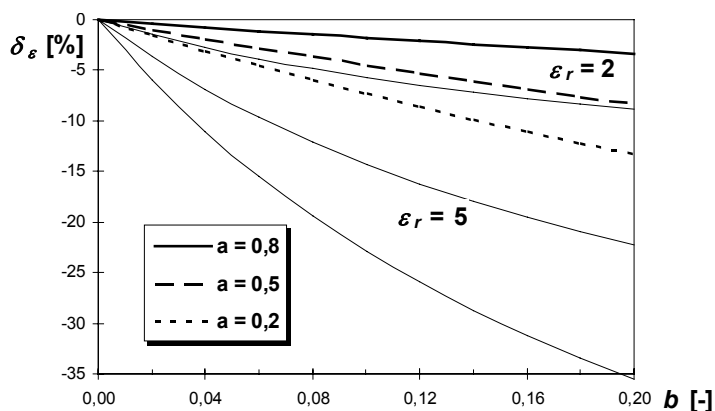
$$\frac{d\delta}{da} = \frac{1}{a-1}, \quad \frac{d\delta}{db} = \frac{1}{b[1+b(\varepsilon_r-1)]}, \quad \frac{d\delta}{d\varepsilon_r} = \frac{1}{(\varepsilon_r-1)[1+b(\varepsilon_r-1)]}. \quad (6)$$



Rys. 2. Zależność względnego błędu wyznaczenia $\epsilon_r = 3,5$, wywołanego niecałkowitym kontaktem próbki z elektrodami (a) i szczeliną o względnej grubości b
 Fig. 2. Dependence of relative error of $\epsilon_r = 3,5$, produced by partial contact sample-electrodes (a) and slot with relative thickness b

3. WNIOSKI

Wyniki badań przenikalności materiałów izolacyjnych w formie cienkiej folii, przy małych częstotliwościach w zestawie trójelektrodowym, przeznaczonym do badania rezystywności przy prądzie stałym mogą być obarczone błędem niedoskonałości przylegania materiału do elektrod na całej powierzchni. Zasadnicze znaczenie ma



Rys. 3. Przekrój takiej powierzchni jak na rys. 2, dla trzech wartości parametru a i dwóch ϵ_r
 Fig. 3. Section such surface as on fig. 2, for three values of parameter a and for two of ϵ_r

w tym przypadku jakość powierzchni elektrod i próbki, tym większe, im cieńsza jest próbka. Niewątpliwie między grubością powstałych szczelin powietrznych a powierzchnią rzeczywistego styku próbka-elektroda istnieje korelacja, ale dotyczy ona indywidualnych przypadków elektrod i próbek i nawet nie starano się analizować tego zagadnienia. Błędy mogą sięgać nawet kilkudziesięciu procent, jeżeli próbka jest bardzo cienka, rzędu kilkudziesięciu mikrometrów, a materiał ma przenikalność wyraźnie większą od 1, np. rzędu 3,5–5. W przypadku wyników o większej od spodziewanej rozbieżności z teorią (np. danymi producenta materiału) można ocenić, czy możliwe jest takie odstępstwo, na podstawie tego typu wykresów jak przykładowy pokazany na rys. 3.

LITERATURA

- [1] IEC 60093 Standard, *Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials*, 1980.
- [2] KEITHLEY, *Model 8009 Resistivity Test Fixture*, Test & Measurements Product Catalog and Reference Guide, Keithley Instruments Inc., USA, 2005.
- [3] LISOWSKI M., *Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004.
- [4] MADEJ P., *Trójelektrodowy zestaw pomiarowy z dodatkowym pierścieniem do badania próbek materiałów izolacyjnych*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 5, 2001, 9–12.
- [5] MARCONI INSTRUMENTS, *TF 1245 Circuit Magnification Meter*, Operating and Maintenance Handbook, St. Albans, Hertfordshire, England, 1968.
- [6] QUADTECH, *Dielectric Cells for Different Applications*, Application Note, Watertown, Massachusetts, USA, 2008.

A CONTACT ERROR IN THE ELECTRICAL PERMITTIVITY DETERMINATION IN A THREE-ELECTRODES TEST SET

The electrical permittivity of dielectric material is tested at low frequencies also in a test set with three electrodes, designed first of all to test the resistivity of a material. A material sample has the form of a very thin sheet of foil. Poor contact between a very thin sample and the electrodes may cause an error in the permittivity value determination. This paper presents the impact analysis of the sample thickness and the permittivity value on this error.