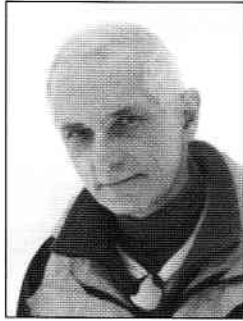


Piotr MADEJ

POLITECHNIKA WROCLAWSKA
 INSTYTUT MASZYN, NAPĘDÓW I POMIARÓW ELEKTRYCZNYCH

Trójelektrodowy zestaw pomiarowy z dodatkowym pierścieniem do badania próbek materiałów izolacyjnych

dr inż. Piotr MADEJ



Studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej ukończył w 1974 r. i został zatrudniony w Instytucie Metrologii Elektrycznej. W roku 1983 obronił pracę doktorską. Obecnie jest adiunktem naukowo-dydaktycznym, pracuje naukowo w dziedzinie pomiarów elektrycznych i elektronicznej aparatury pomiarowej, a przede wszystkim w elektrometrii - przetwarzanie bardzo słabych sygnałów, badania zjawisk elektryczności, gigaomierze, pikoamperomierze.

Streszczenie

Próbki stałych materiałów elektroizolacyjnych bada się zgodnie z zaleceniami norm między innymi w trójelektrodowym zestawie pomiarowym. Umożliwia on wyznaczenie parametrów materiałowych: rezystywności skrośnej i powierzchniowej. Wprowadzenie do zestawu dodatkowego metalowego pierścienia eliminuje pasywną rezystancję izolacji elektrod, bocznikującą mierzoną rezystancję powierzchniową próbki. Wadą jest pojawienie się dodatkowego składnika rezystancji bocznikującej wejście prądowe przyrządu pomiarowego – gigaomierza.

Abstract

Testing of solid electroinsulation materials samples is done also in three-electrodes measurement set according to standards recommendations. It enables to determine properties of materials: volume and surface resistivity. The bringing additional metal ring into the electrodes set separates insulation of electrodes – it enables to eliminate parasiting insulation resistance, shunting measuring surface resistance of sample. Instead of it there will be two resistances: shunting source of measurement voltage and current input of measurement instrument – gigaohmmeter. This effect of shunting is negligible in case of using the instrument with active input *iu* converter, even with relative small resistances of insulators.

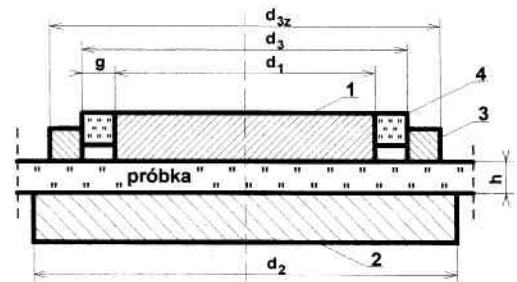
ZASADY BUDOWY I STOSOWANIA ZESTAWU TRÓJELEKTRODOWEGO

Zestaw trójelektrodowy w swojej podstawowej konfiguracji służy do badania próbek stałych materiałów izolacyjnych (rys. 1). Próbka powinna mieć grubość znacznie mniejszą od średnicy (krążek) lub od długości i szerokości (płytką prostokątną) oraz gładkie i równoległe dwie większe płaszczyzny. Powinna także wystawać poza obrys największej elektrody. Trzy metalowe elektrody 1, 2, 3, najczęściej okrągłe, przylegające do powierzchni próbki umożliwiają zmierzenie rezystancji skrośnej R_v i powierzchniowej R_s przy określonym napięciu pomiarowym U_p . Parametry materiału: rezystywność skrośną ρ_v i powierzchniową ρ_s przelicza się ze zmierzonych rezystancji uwzględniając wymiary geometryczne elektrod. W normach dotyczących pomiarów rezystancji stałych materiałów elektroizolacyjnych (np. [5]) podane są warunki, jakie muszą spełniać wymiary poszczególnych elektrod i próbki oraz parametry aparatury pomiarowej.

Aparatura mierzcząca rezystancję musi zawierać dwa bloki: źródło napięcia pomiarowego U_p oraz tor prądowy (nanoamperomierz),

mierzący prąd I_x z próbki – wynik przyłożenia U_p (rys. 2). Często oba bloki tworzą jeden przyrząd zwany mega- lub gigaomierzem ([2], [4]), do którego bezpośrednio przyłącza się oferowany przez firmy uniwersalny zestaw trójelektrodowy ([2], [3]). Wyróżnia się w takim przyrządzie dwa główne zaciski: wyjście Hi (high) napięcia pomiarowego i wejście Lo (low) toru prądowego. Dodatkowy zacisk Sh (shield) – masa elektryczna układów w przyrządzie służy do dołączenia ekranów kabli Hi i Lo oraz elektrody ochronnej. Obudowy elektrod i przyrządu powinny być uziemione, dopuszczalne jest połączenie masy Sh z uziemieniem.

Elektrodą o stałej funkcji jest elektroda 1, połączona z wejściem Lo gigaomierza; s pływa do niej prąd I_x z próbki, mierzony przez tor prądowy. Funkcje elektrod 2 i 3 zależą od rodzaju mierzonej aktualnie rezystancji. W pomiarach rezystancji skrośnej (rys. 2a) elektroda 2 jest elektrodą napięciową, a elektroda 3 pełni funkcję pierścienia ochronnego – zmniejsza zniekształcenia brzeżo-



Rys. 1. Próbka materiału z elektrodami. 1, 2, 3 – metalowe okrągłe elektrody; 4 – izolacja elektrod 1 i 3; d_1 , d_2 , d_3 – średnice elektrod; g – szerokość szczeliny między elektrodami 1 i 3; h – grubość próbki.

we pola elektrycznego w próbce oraz uniemożliwia przepływ prądów po powierzchni próbki od elektrody 2 do 1. W pomiarach rezystancji powierzchniowej (rys. 2b) funkcje elektrod są przeciwne. Elektrodą napięciową jest elektroda 3, a elektroda 2 jest ochronną – s pływa do niej główna część prądu skrośnego od elektrody 3. Zmierzone wartości rezystancji skrośnej R_v i powierzchniowej R_s – stosunki napięcia pomiarowego U_p do prądu I_x przelicza się na odpowiednie rezystywności według zależności (wymiary z rys. 1):

$$\rho_v = \frac{S_e}{h} R_v = \frac{\pi(d_1+d_3)^2}{16h} R_v = \frac{k_v}{h} R_v \quad [\Omega \cdot m] \quad (1)$$

$$\rho_s = \frac{L_e}{g} R_s = \frac{\pi(d_1+d_3)}{2g} R_s = k_s \cdot R_s \quad [\Omega] \quad (2)$$

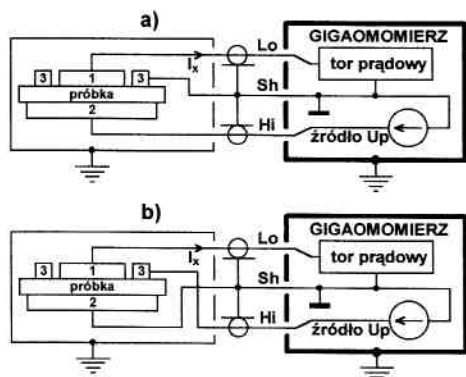
gdzie:

S_e i L_e – efektywna powierzchnia i efektywny obwód elektrod pomiarowych,

k_v i k_s – współczynniki zwane stałymi elektrod.

Przy stosowaniu uniwersalnego zestawu elektrod należy upewnić się, czy elektrody 1 i 3 mają niewielkie luzy, umożliwiające dostosowanie się do odchylenia w geometrii próbki (np. niewielkiej nierównoległości płaszczyzn). Drugim ważnym problemem jest dokładność przylegania elektrod całą powierzchnią do próbki. Stosowanie dodatkowych mediów polepszających kontakt jest dopuszczalne jedynie przy pomiarze rezystancji skrośnej – możliwość

zanieczyszczenia nimi powierzchni próbki między elektrodami 1 i 3 zmniejsza wiarygodność pomiaru rezystancji powierzchniowej. Pokrycie powierzchni elektrod przewodzącą gumą rozwiązuje ten problem.

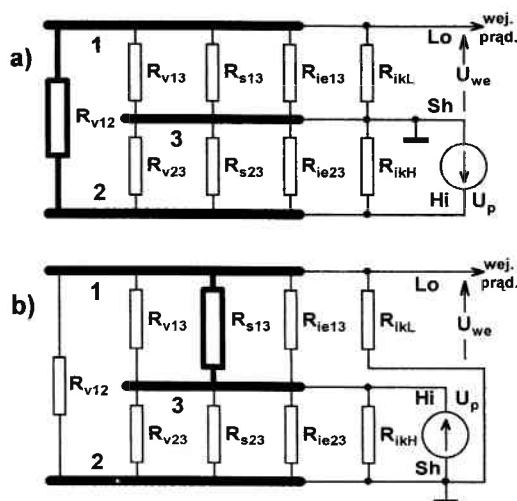


Rys. 1. Układy do pomiaru rezystancji: a) skrośnej R_v , b) powierzchniowej R_s . Gigaomierz: Lo – wejście prądowe, Hi – wyjście napięciowe, Sh – ekrany (masa).

Badacz powinien zadać sobie pytanie, czy zmierzone przyrządem wartości rezystancji R_v i R_s są tymi, które zależą wyłącznie od odpowiednich rezystywności materiału? W celu analizy tego zagadnienia przedstawiono na rys. 3 zastępczą sieć rezystancji próbki, izolatorów i kabli łączeniowych. Na rysunku wyróżniono pogrubioną linią tę rezystancję, której zmierzenie jest pożądane. W pierwszym przypadku jest to R_{v12} , a w drugim R_{s13} , natomiast przyrząd zmierzy wypadkową rezystancję między Hi i Lo. Z rys. 3a wynika, że w zasadzie mierzona jest rzeczywiście rezystancja skrośna R_{v12} . Pewne problemy interpretacji wyniku mogą pojawić się w przypadku badania bardzo cienkich próbek, gdy szerokość szczeliny g znacznie przekracza grubość próbki h . Znacznie gorzej jest w przypadku pomiaru rezystancji powierzchniowej (rys. 3b); zostanie zmierzona wartość równoległego połączenia trzech rezystancji: pożądanej R_{s13} oraz resztkowej skrośnej R_{v13} i izolatora R_{ie13} , rozdzielającego elektrody 1 i 3 (element 4 na rys. 1). Wpływu rezystancji R_{v13} nie da się wyeliminować zarówno przy badaniu próbki materiału jak i przy jego stosowaniu w technice. To co powszechnie uważa się za rezystancję powierzchniową zawsze ma równoległy składnik pochodzący od rezystancji skrośnej, nie ma więc potrzeby eliminowania go z wyniku pomiaru. Drugi pasożytniczy składnik R_{ie13} pochodzi od rezystancji skrośnej i powierzchniowej izolatora; może mieć znaczący udział w wyniku pomiaru a często umożliwiać nawet szacunkowy pomiar R_s próbki dobrego materiału izolacyjnego. Duży wpływ ma w tym przypadku narażenie obu zewnętrznych powierzchni izolatora przez długi okres czasu na oddziaływanie otoczenia. Poziom rezystancji R_{ie13} rzędu $1 \cdot 10^{12} \Omega$ (średni poziom) zezwala na pomiar $R_s \leq 1 \cdot 10^{11} \Omega$ przy założeniu dopuszczalnego wpływu R_{ie13} rzędu 10%. Za pomocą elektrod o wymiarach np.: $d_1=50\text{mm}$, $d_3=56\text{mm}$, $g=3\text{mm}$, czyli o współczynniku $k_s=55,5$ nie powinno się w tych warunkach badać materiałów o $\rho_s > 5 \cdot 10^{12} \Omega$. Literatura specjalistyczna (np. [1], str. 82) i Polska Norma [5] pomijają to zagadnienie. W punkcie 2 artykułu przedstawiono sposób likwidacji tego problemu.

Te uwagi mają oczywiście sens, gdy zastosowany jest pierścień izolacyjny 4 (rys. 1), wiążący mechanicznie elektrody 1 i 3. W stosowanym niekiedy rozwiązaniu bez izolatora, jedynie z izolacją powietrzną składnik R_{ie13} może być pominięty, ale rośnie niedokładność określenia szerokości szczeliny g oraz jest duże prawdopodobieństwo zwarcia elektrod 1 i 3, co zagraża miernikowi.

Pozostałe elementy zastępczych sieci z rys. 3 można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej zaliczają się te, które bocznikują źródło napięcia U_p . Są to w obu pomiarach rezystancje: R_{v23} , R_{s23} , R_{ie23} , R_{ikH} (oznaczenia na rys. 3). Obciążają one jedynie źródło i nie

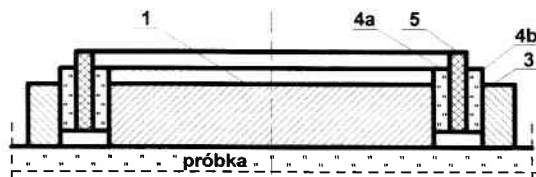


Rys. 3. Zastępcza sieć rezystancyjna w pomiarze rezystancji: a) skrośnej, b) powierzchniowej; 1, 2, 3 – elektrody. Indeksy rezystancji: v12...v23 – skrośne próbki (np. v12 między 1 i 2); s13, s23 – powierzchniowe próbki; ie13, ie23 – izolatorów; ikL, ikH – izolacji kabli Lo i Hi.

mają wpływu na wynik pomiaru. Druga grupa rezystancji bocznikuje wejście prądowe przyrządu. W pomiarze rezystancji skrośnej są to: R_{v13} , R_{s13} , R_{ie13} , R_{ikL} , a w pomiarze rezystancji powierzchniowej R_{v12} i R_{ikL} . Wpływ tych rezystancji zależy od zastępczej wejściowej rezystancji toru prądowego, tzn. od spadku napięcia U_{we} między Lo i Sh spowodowanego mierzonym prądem I_x . To zagadnienie omówiono w punkcie 3 artykułu.

DODATKOWY PIERŚCIEŃ EKRANUJĄCY

Wyeliminowanie rezystancji R_{ie13} izolatora 4, bocznikującej mierzoną rezystancję R_{s13} próbki polega na wstawieniu pomiędzy elektrody 1 i 3 dodatkowego metalowego pierścienia. Nie może się on stykać z próbką i musi być odizolowany dwoma pierścieniowymi izolatorami od obu elektrod. Ideę tego rozwiązania przedstawiono szkicowo na rys. 4. Pierścień ekranujący spełni swoją rolę, gdy będzie połączony z potencjałem odniesienia aparatury – masą Sh.



Rys. 4. Pierścień ekranujący między elektrodami. 1, 3 – elektrody (jak na rys. 1); 5 – pierścień ekranujący; 4a, 4b – dwa pierścienie izolujące.

W pomiarach rezystancji powierzchniowej (rys. 5) elektroda 3 ma wysoki potencjał i prąd wpływający izolatora 4b spływa do pierścienia ekranującego 5; modeluje to element R_{ie35} na rys. 6. Obciąża on jedynie źródło napięcia pomiarowego, razem z już wcześniej wymienionymi rezystancjami (rys. 3b). Rezystancja upływu izolatora 4a (R_{ie15} na rys. 6) jest dodatkową, równoległą do R_{ikL} kabla Lo i skrośnej R_{v12} próbki, które istnieją także przy tradycyjnej konfiguracji elektrod. Rezystancje te łączniczą bocznikują wejście prądowe przyrządu.

W pomiarach rezystancji skrośnej dodatkowy pierścień ekranujący nie ma praktycznie wpływu na rezystancje bocznikujące. Elektroda 3 i pierścień 5 są połączone z masą Sh, rezystancja R_{ie35} izolatora 4b jest zwarta natomiast rezystancja R_{ie15} izolatora 4a zastępuje rezystancję R_{ie13} z rys. 3a izolatora 4 (rys. 1).

Wykazano, że dodanie pierścienia ekranującego likwiduje bezpośrednie bocznikowanie mierzonej rezystancji powierzchniowej

próbki przez rezystancję izolatora między elektrodami 1 i 3. W przypadku dążenia do prostej, łatwej do wykonania i złożenia konstrukcji z pierścieniem wzrasta prawdopodobieństwo niecentryczności elektrody 3 w stosunku do elektrody 1 czyli zmian szerokości szczeliny g . W pomiarach rezystancji skrośnej powoduje to stosunkowo niewielką deformację pola elektrycznego na brzegu elektrody 1 i praktycznie jest do pominięcia. W pomiarach rezystancji powierzchniowej wartość g jest w mianowniku współczynnika k_s (wzór (2)) i niedokładność jej określenia ma bezpośredni wpływ na ostateczną niedokładność wyznaczenia rezystywności ρ_s . Jeżeli δ_{nc} jest względnym przesunięciem środków elektrod 1 i 3 w stosunku do nominalnej szerokości szczeliny g , to wynikowa niedokładność względna obliczenia ρ_s :

$$\delta_{\rho} \approx -0,4\delta_{nc}^2 \quad (3)$$

Przykładowo dla δ_{nc} równego 0,1 i 0,5 niedokładności będą równe $-0,4\%$ i -10% . Znacznie większe znaczenie może mieć zależność rezystywności materiału od natężenia pola: dla $\delta_{nc}=0,5$ stosunek maksymalnego do minimalnego natężenia pola elektrycznego w szczelinie wynosi 3.

EFEKT BOCZNIKOWANIA WEJŚCIA PRĄDOWEGO PRZYRZĄDU

Efekt bocznikowania występuje przy stosowania obu typów konfiguracji elektrod: tradycyjnej i z dodatkowym pierścieniem, zarówno przy pomiarze rezystancji skrośnej, jak i powierzchniowej. Wnioski sformułowane w tej części mają jeszcze szerszy zakres ważności; dotyczą wszystkich przypadków pomiarów wielkich rezystancji przy stałym napięciu pomiarowym.

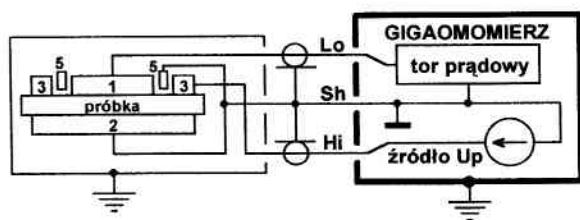
Wpływ tego efektu zależy w dużym stopniu od rozwiązania układowego wejścia prądowego przyrządu. Rozwiązania te różnią się sposobem włączenia wzorcowego opornika o rezystancji R_N w obwód wejściowego wzmacniacza elektrometrycznego WEM (rys. 7).

W pierwszym układzie (rys. 7a) wzmacniacz pracuje w układzie wtórnika a opornik wzorcowy R_N jest włączony między wejście prądowe Lo i masę Sh. Takie rozwiązanie nosi nazwę biernego przetwornika *ilu*. Jego zastępcza wejściowa rezystancja jest w przybliżeniu równa R_N . W drugim układzie (rys. 7b) opornik R_N jest w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza WEM. Jest to układ zwany aktywnym przetwornikiem *ilu*, o wejściowej rezystancji w przybliżeniu R_N/k_r , gdzie k_r – różnicowe wzmocnienie WEM z otwartą pętlą sprzężenia, co najmniej $1 \cdot 10^4$ V/V. W przypadku spełnienia w układzie a) warunku $U_p \gg U_{we} \approx I_x \cdot R_N$, moduł napięcia wyjściowego U_o w obu układach jest w przybliżeniu taki sam, przy czym w układzie b) znak jest ujemny przy dodatnim U_p . Mierzoną rezystancję R_x wyznacza się nominalnie (z pominięciem niedokładności) z zależności:

$$R_x = \left| \frac{U_p}{U_o} \right| R_N \quad (4)$$

Najczęściej w badaniach próbek materiałów wartość napięcia pomiarowego $U_p \geq 10$ V, ale w wielu innych dziedzinach pożądane U_p może być nawet rzędu miliwoltów. Napięcie wyjściowe z przetwornika *ilu* jest zwykle na poziomie $|U_o| \leq 0,1$ V lub ≤ 1 V. Rezystancja opornika wzorcowego R_N z reguły nie przekracza $1 \cdot 10^{10} \Omega$, ze względu na ograniczoną klasę i stabilność wysokoomowych oporników.

Niedokładność pomiaru rezystancji R_x wprowadzana przez łączną rezystancję bocznikującą R_{bL} zależy wprost od spadku napięcia U_{we} na wejściu prądowym przyrządu. W układzie z rys. 7a $U_{we} \approx U_o$ natomiast w układzie z rys. 7b jest on k_r razy mniejszy. Poniżej podano niedokładność względną pomiaru rezystancji; za



Rys. 5. Układ z pierścieniem ekranującym 5 do pomiaru rezystancji powierzchniowej.

wartość zmierzoną przyjęto wynik z (4) oraz założono, że prąd I_{we} wzmacniacza elektrometrycznego WEM jest pomijalny w porównaniu z prądem I_x :

– bierny przetwornik, rys. 7a

$$\delta_{R_x} = \frac{R_N}{R_x} + \frac{R_N}{R_{bL}} \approx \frac{U_o}{U_p} + \frac{R_N}{R_{bL}} \quad (5)$$

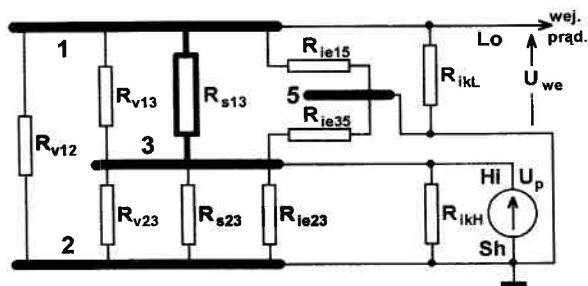
– aktywny przetwornik, rys. 7b

$$\delta_{R_x} \approx \frac{1}{k_r} \left(1 + \frac{R_N}{R_x} + \frac{R_N}{R_{bL}} \right) \approx \frac{1}{k_r} \left(1 + \left| \frac{U_o}{U_p} \right| + \frac{R_N}{R_{bL}} \right) \quad (6)$$

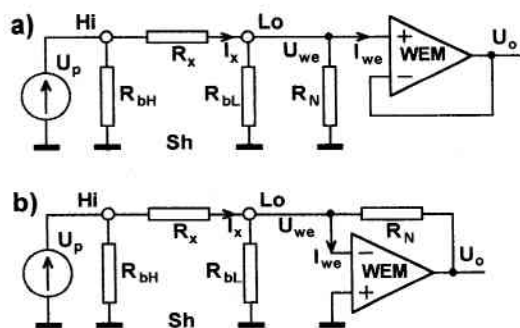
Wnioski

Wyniki analizy (zależności (5), (6)) wskazują na duży wpływ w układzie z rys. 7a rezystancji R_{bL} z przedziału $< R_x$, niedopuszczalny jest jej poziom zbliżony do R_N . Przy dopuszczeniu błędu spowodowanego efektem bocznikowania do 1%, rezystancja R_{bL} musi przynajmniej 100 razy przekraczać R_N ; powinna być powyżej $1 \cdot 10^{12} \Omega$. Praca układu jest dopuszczalna przy spełnieniu warunku $R_x/R_N \approx U_p/U_o \gg 1$. Ten warunek dla $U_p=10$ V i $U_o=1$ V nie jest spełniony, błąd (5) osiągnie 10%.

W układzie z rys. 7b rezystancje R_{bL} i R_N mogą być bliskie R_x , co odpowiada dopuszczeniu pracy także w zakresie wartości stosunku $|U_p/U_o|$ bliskich 1. Dalsze zmniejszanie tego stosunku grozi



Rys. 6. Zastępcza sieć rezystancji w pomiarze rezystancji powierzchniowej z pierścieniem ekranującym. R_{ie15} , R_{ie35} – rezystancje izolatorów 4a i 4b z rys. 4, pozostałe – rys. 3b.



Rys. 7. Obwody wejścia prądowego Lo gigaomomierza: a) z biernym przetwornikiem *ilu*, b) z aktywnym przetwornikiem *ilu*. R_x – mierzona rezystancja, R_N – opornik wzorcowy, R_{bL} – rezystancje bocznikujące wejście, WEM – elektrometryczny wzmacniacz operacyjny.

dużym udziałem w wyjściowym napięciu U_o wzmocnionego $(1+R_N/R_x)$ razy napięcia niezrównoważenia wzmacniacza WEM. Ta uwaga dotyczy także stosunku R_N/R_{bL} we wzorze (6). Reasumując rezystancja bocznikująca R_{bL} w tym układzie nie powinna być mniejsza od około $1 \cdot 10^{10} \Omega$.

Znaczący udział w bocznikującej rezystancji R_{bL} ma z reguły kabel łączący elektrodę 1 z wejściem Lo, o rezystancji R_{kL} . Można w dużym stopniu zmniejszyć jego wpływ w układzie z rys. 7a przez zastosowanie tzw. aktywnego ekranu, tj. połączenie ekranu tego kabla z potencjałem $U_o \approx U_{we}$. Dołączenie pierścienia ekranującego 5 do tego potencjału zmniejszy także znacznie wpływ rezystancji R_{ie15} izolatora 4a (rys. 6 i 4). Istotnymi składnikami R_{bL} pozostaną w tym przypadku rezystancje R_{v13} i R_{s13} próbki w pomiarach rezystancji skośnej lub R_{v12} próbki w pomiarach rezystancji powierzchniowej. Na te wielkości konstruktor aparatury nie ma wpływu.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule rozwiązanie trójelektrodowego zestawu do badań próbek materiałów elektroizolacyjnych, uzupełnionego dodatkowym pierścieniem ekranującym całkowicie eliminuje bezpośredni bocznikujący wpływ rezystancji izolatora konstrukcyjnego (centrującego) na wynik pomiaru rezystancji powierzchniowej próbki, niezależnie od jej wartości. Rozwiązanie to w praktyce niczego nie zmienia w pomiarach rezystancji skośnej. Rezystancja

izolatora centrującego jest teraz jednym ze składników bocznikujących wejście prądowe gigaomierza. W przypadku gdy to wejście jest w konfiguracji aktywnego przetwornika i/u , dopuszczalna minimalna rezystancja bocznikująca je może mieć wartość nawet $1 \cdot 10^{10} \Omega$. Wnioski sformułowane w punkcie 3 są ogólne – dotyczą efektu bocznikowania wejścia prądowego gigaomierza we wszystkich jego zastosowaniach; umożliwiają oszacowanie dopuszczalnych rezystancji bocznikujących przy określonym błędzie od ich wpływu na daną konfigurację wejściowego stopnia gigaomierza.

Wadą rozwiązania z pierścieniem ekranującym jest zwiększenie złożoności konstrukcji i nieznaczące – zdaniem autora, pogorszenie dokładności określenia szerokości szczeliny między elektrodami. Nie ma sensu stosowanie tego rozwiązania, gdy dopuszcza się badania za pomocą zestawu bez izolatora centrującego elektrody, jednak autor nie zaleca posługiwania się takim zestawem – przesłanki podano w punkcie 1 artykułu.

LITERATURA

- [1] A.S. GAJEWSKI: Elektryczność statyczna. *IWZZ, Warszawa 1987.*
- [2] HIRESTA, Instrument For Both Surface And Volume Resistivity Measurements. *Mitsubishi Co., Ltd.*
- [3] KEITHLEY: Test & Measurement Catalog and Reference Guide. *Keithley Instruments Inc., 1993-1994.*
- [4] Z. KŁOS, P. MADEJ: Elektroniczny megaomierz analogowy typ EMA-1. *PAK 1994, nr 1, str.3-5.*
- [5] POLSKA NORMA: Materiały elektroizolacyjne stałe. Pomiar rezystancji. *PKN MiJ, PN-88/E-04405.*