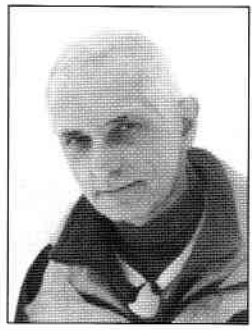
Zbigniew Kłos, Piotr MADEJ
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT MASZYN, NAPĘDÓW I POMIARÓW ELEKTRYCZNYCH

Imitowany wzorzec wielkich rezystancji typu IZWR-2

Dr inż. Zbigniew KŁOS

Studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej ukończył w 1968 r. i podjął pracę w Instytucie Metrologii Elektrycznej, gdzie także obronił pracę doktorską. Aktualnie pracuje jako adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, gdzie prowadzi prace badawcze w zakresie wysokoomowych wzorców rezystancji oraz aparatury elektrometrycznej dla ochrony środowiska.

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 elektryzacji, gigaomomierze, pikoamperomierze.

Streszczenie

Przedstawiono zestaw kontrolny wzorców rezystancji o wartościach dziesiętnych zawartych w przedziale 10^4-$10^{14}\Omega$. W zakresie 10^4-$10^{10}\Omega$ jako wzorców użyto materialnych, precyzyjnych rezystorów drutowych kl. 0,1 i wysokoomowych typu MOX kl. 0,5 i 1. Wartości rezystancji 10^{11}, 10^{12}, 10^{13} i $10^{14}\Omega$ uzyskano metodą imitacji wykorzystując właściwości przekształcenia układu gwiazdy w trójkąt. Bierny imitator w układzie gwiazdy składa się z jednego wysokoomowego rezystora precyzyjnego o wartości $10^{10}\Omega$ i dzielnika napięcia złożonego z dwóch przełączanych rezystorów niskoomowych.

Abstract

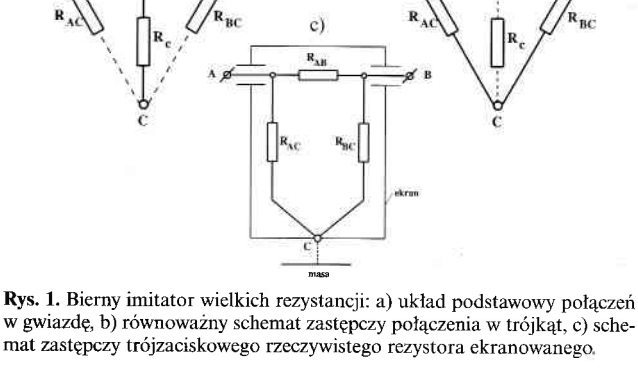
A comparative set of resistance standards with decimal values ranging from 10^4 to $10^{14}\Omega$ was presented. In the range 10^4 to $10^{14}\Omega$ as a standard, material, precision wire-wound resistors of class 0,1 and high-resistance resistors of type MOX, class 0,5 and class 1 were used. The resistances with values 10^{11}, 10^{12}, 10^{13} and $10^{14}\Omega$ were obtained with an imitation method that makes use of features of the wye-delta transformation. The passive imitator in the wye connection consists of one high-resistance precision resistor of $10^{10}\Omega$ and a voltage divider including two change-over low-resistance resistors.

Wprowadzenie

Sprawdzanie aparatury elektrometrycznej – mierników wielkich rezystancji, mostków wysokoomowych i pikoamperomierzy – nastręcza sporo trudności ze względu na ekstremalne wartości zakresów tej aparatury. Szczególnie trudne jest sprawdzanie gigaomomierzy i teraomomierzy o najwyższym zakresie pomiarowym przekraczającym $10^{14}\Omega$ metodą bezpośredniego podstawienia wzorca [9]. Spowodowane jest to brakiem wysokoomowych wzorców rezystancji o odpowiedniej wartości i dokładności. Dlatego też sprawdzanie gigaomomierzy często przeprowadza się metodami pośrednimi, np. sprawdzając poprawność elementów gigaomomierza lub jego bloków funkcjonalnych [4, 5]. Sprawdzanie takie ma dwie główne wady: wymaga dobrej znajomości budowy gigaomomierza [9], a poza tym nie jest przeprowadzane w warunkach rzeczywistych, w jakich odbywa się pomiar. Precyzyjne rezystory drutowe [3] mogące posłużyć jako wzorce kontrolne budowane są z reguły jedynie do wartości $10^8\Omega$-$10^9\Omega$. Takie rezystory odznaczają się dobrą klasą dokładności 0,005-0,01%, dużymi gabarytami i wysoką ceną. Można nimi sprawdzać jedynie niższe i średnie zakresy gigaomomierza i mostka wysokoomowego. Wieloletnie prace prowadzone przez autorów nad zastosowaniami rezystorów wysokoomowych typu MOX [7, 8] doprowadziły do opracowania i wykonanianych i tanich nastawnych wzorców rezystancji – opornicy dekadowej i zestawu kontrolnego rezystorów wysokoomowych, których górny zakres nastawianych rezystancji wynosi $10^{11}\Omega$ [1, 2]. Napięcie robocze tych wzorców jest wysokie, dochodzi do 2,5-5kV, co pozwala sprawdzać mierniki i próbniki izolacji na stanowisku roboczym metodą bezpośredniego podstawienia wzorca. Jakkolwiek parametry metrologiczne tych wzorców są bardzo dobre, to zakres rezystancji ciągle jest za mały do testowania gigaomomierzy, teraomomierzy i mostków wysokoomowych na najwyższych zakresach.

W niniejszym artykule przedstawiono opracowany przez autorów model wzorca, w którym do realizacji najwyższych wartości – 10^{11}, 10^{12}, 10^{13} i $10^{14}\Omega$ – zastosowano imitację rezystancji opartą na zasadzie przekształcania układu gwiazdy w trójkąt. Bierny imitator w układzie gwiazdy zbudowany z wysokoomowego rezystora $10^{10}\Omega$ o stałej wartości i regulowanego skokowo niskoomowego dzielnika rezystancyjnego pozwala uzyskać zwiększenie nawet do 10^4 razy rezystancji zastępczej między wejściem i wyjściem przy niezbyt dużej stracie dokładności wzorca.

Stosowanie imitacji rezystancji obwarowane jest pewnymi ograniczeniami i każdorazowo wymaga indywidualnej analizy wpływu włączenia imitatora na pracę badanego miernika. Zasady stosowania imitowanych wzorców przedstawione zostaną w odrębnej publikacji. Wadą prezentowanego wzorca jest to, że umożliwia



Rys. 1. Bierny imitator wielkich rezystancji: a) układ podstawowy połączeń w gwiazdę, b) równoważny schemat zastępczy połączenia w trójkąt, c) schemat zastępczy trójzaciskowego rzeczywistego rezystora ekranowanego.

kontrolę tylko w ograniczonym zakresie, tzn. w jednym lub najwyżej w dwóch punktach na każdym zakresie pomiarowym a także przy napięciu nie przekraczającym 1000V. Dla niższych wartości rezystancji napięcie robocze wzorca jest jeszcze niższe i ograniczone mocą dopuszczalną użytych rezystorów.

Zasada imitacji rezystancji

Bierny imitator rezystancji zbudowany jest z trzech rezystorów R_a, R_b i R_c połączonych w gwiazdę w sposób pokazany na rys. 1a. Układ gwiazdy z rys. 1a można przekształcić w równoważny trójkąt z rys. 1b, a wartości rezystancji R_{AB}, R_{AC} i R_{BC} „widzianych" między węzłami A, B i C oblicza się z poniższych wzorów

$$R_{AB} = R_a + R_b + \frac{R_a \cdot R_b}{R_c} \quad (1)$$

$$R_{AC} = R_a + R_c + \frac{R_a \cdot R_c}{R_b} \quad (2)$$

$$R_{BC} = R_b + R_c + \frac{R_b \cdot R_c}{R_a} \quad (3)$$

Jeżeli rezystor R_b imitatora (gwiazdy) jest znacznie większy od dwóch pozostałych, tzn. $R_b >> R_a$, R_c, wtedy wzory (1), (2), (3) uproszczą się do postaci

$$R_{AC} \approx R_a \quad (4)$$

$$R_{BC} \approx R_b \quad (5)$$

$$R_{AB} \approx R_b\left(1+\frac{R_a}{R_c}\right) = w_i \cdot R_b \quad (6)$$

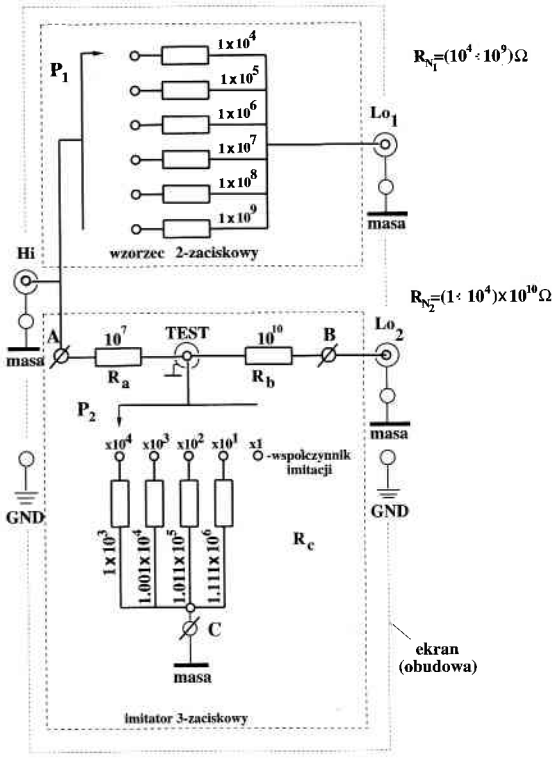
gdzie: $w_i = 1 + \frac{R_a}{R_c}$ – współczynnik imitacji.

Rezystancje zastępcze równoważnego trójkąta o wierzchołkach ABC mają ścisłe odpowiedniki w praktycznym schemacie trójzaciskowego rzeczywistego wzorca rezystancji przedstawionego na rys. 1c. W schemacie tym właściwa rezystancja wzorca określona jest między zaciskami AB analogicznie do rezystancji RAB trójkąta z rys. 1b. Z kolei, rezystancje R_{AC} i R_{BC} razem z rezystancjami upływu izolatorów są pasożytniczymi rezystancjami bocznikującymi zaciski A i B do niskopotencjałowego zacisku ochronnego C (ekranu) i mogą zmieniać warunki pracy badanego miernika rezystancji. W praktyce większość gigaomomierzy laboratoryjnych o szerokim zakresie pomiarowym wykorzystuje techniczną metodę pomiaru przy stałym napięciu pomiarowym przedstawioną w publikacji [9, 6]. Dla takich gigaomomierzy rezystancja R_{AC} będzie jedynie obciążała źródło napięcia pomiarowego i jej wpływ będzie pomijalny. Rezystancja R_{BC} będzie bocznikowała niskoomowe wejście prądowe gigaomomierza (lub wejście pikoamperomierza), dlatego też w czasie sprawdzania przyrządów każdorazowo należy przeanalizować jej wpływ i ewentualnie uwzględnić w postaci poprawki. W większości przypadków wpływ ten będzie jednak do pominięcia. Przystępując do sprawdzania miernika rezystancji o określonej konstrukcji dobrze jest wstępnie zdefiniować zakres zmienności R_{AC} i R_{BC}, który nie powoduje zauważalnych dodatkowych błędów pomiaru, zwłaszcza na najwyższych zakresach.

Budowa wzorca

Prace badawcze prowadzone przez autorów doprowadziły do opracowania trzech wersji nastawnych wzorców wielkich rezystancji, z których dwa pierwsze modele – opornica wysokoomowa i zestaw kontrolny wzorców wysokoomowych typu ZKRW-1 – były już przedmiotem publikacji [1] i [2]. Kolejnym modelem jest prezentowany w niniejszym artykule wzorzec imitowany typu IZWR-2. Schemat ideowy tego wzorca przedstawiony jest na rys. 2.

W układzie przedstawionym na rys. 2 można wyróżnić dwa odrębne bloki wzorców. Pierwszy z nich składa się z sześciu sztuk pre-



Rys. 2. Schemat ideowy imitowanego kontrolnego wzorca wielkich rezystancji typu IZWR-2.

cyzyjnych, specjalnie wyselekcjonowanych rezystorów drutowych kl. 0,1 (wartości 10^4, 10^5 i $10^6\Omega$) i wysokoomowych typu MOX kl. 0,5 i 1 firmy Victoreen (wartości 10^7, 10^8 i $10^9\Omega$) przełączanych elektrometrycznym przełącznikiem P1 o małej upływności izolacji. Jest to klasyczny dekadowy dwuzaciskowy rezystor nastawny o wartościach 10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8 i $10^9\Omega$, podobny w swej budowie do wzorców przedstawionych w publikacji [1]. Drugi blok, znacznie ciekawszy pod względem metrologicznym, jest zasadniczym tematem niniejszej publikacji. Stanowi on praktyczną realizację biernego imitatora wielkich rezystancji omówionego w poprzednim rozdziale. Za pomocą tego imitatora można nastawiać (imitować) rezystancje 10^{10}, 10^{11}, 10^{12}, 10^{13} i $10^{14}\Omega$ z dokładnością nie gorszą niż 1÷1,5%. Bazowy rezystor wysokoomowy typu MOX klasy 1 o wartości $10^{10}\Omega$ włączony jest w gałąź R_b gwiazdy. Podobnie w gałąź R_a włączony jest na stałe wysokonapięciowy rezystor MOX o wartości $10^7\Omega$. Natomiast gałąź R_c składa się z czterech skokowo przełączanych rezystorów niskoomowych, za pomocą których zmieniany jest współczynnik imitacji w granicach od 1 do 10^4 x R_b. Maksymalna niedokładność stosunku rezystancji R_a/R_c wynosi 0,5%. Wartość imitowanej rezystancji (nastawionej wartości wzorcowej) zawarta jest między zaciskami H_i i L_{o2}. Warunkiem prawidłowej imitacji jest połączenie zacisku masy imitatora z zaciskiem masy gigaomomierza tak, aby uzyskać trójzaciskową realizację wzorca. Współczynnik imitacji w_i=1 uzyskuje się dla wartości $R_c = \infty$ (brak rezystora). Wówczas między zaciskami H_i i L_{o2} wzorca (punkty A i B) widziane są tylko szeregowo połączone rezystory $R_a = 10^7\Omega$ i $R_b = 10^{10}\Omega$. Ponieważ Ra<<Rb, wtedy $R_{AB} \sim R_b$ z błędem systematycznym 0,1% mniejszym dziesięciokrotnie od klasy rezystora R_b. Ten systematyczny błąd można uwzględniać w formie poprawki lub uwzględnić w procesie kalibracji, tzn. wybrać rezystor $10^{10}\Omega$ z odchyłką ujemną równą –0,1%.

W imitatorze dodatkowo wyprowadzono zacisk środkowy gwiazdy „TEST" jak to pokazano na rys. 2. Wyprowadzenie tego zacisku umożliwia szybkie testowanie (sprawdzenie) elementów składowych imitatora R_a, R_b i R_c bez konieczności wyjmowania go z obudowy.

Dokładność

Ze względu na to, że wzorzec składa się z dwóch części, a mianowicie z wzorca dwuzaciskowego dla niższych i średnich wartości rezystancji oraz trójzaciskowego imitatora dla wartości najwyższych, dokładność nastawionej rezystancji zależy od jej wartości. Dla pierwszych sześciu wartości, tzn. 10^4-$10^{10}\Omega$, dokładność równa jest klasie użytych rezystorów. Jako rezystorów wzorcowych użyto rezystorów drutowych kl. 0,1 i tlenkowych typu MOX kl. 0,5 i 1. Stabilność napięciowa rezystorów tlenkowych MOX dla tych wartości rezystancji jest wysoka (współczynnik napięciowy rezystancji NWR jest ujemny i nie przekracza –(0,1÷2)ppm/V), stąd też dla dopuszczalnego napięcia wzorca (1000 V dla wartości powyżej $10^6\Omega$) zmiana rezystancji jest znacznie mniejsza od klasy rezystora i nie przekracza –(0,01÷0,2)%. Własności rezystorów MOX są przedstawione bardziej szczegółowo w publikacji [7]. Wzorzec imitowany jest znacznie bardziej skomplikowany pod względem budowy. Do realizacji każdej z nastawionych wartości rezystancji potrzebne są trzy rezystory, których tolerancje wykonania mają wpływ na końcową dokładność. Przy wyższych wartościach rezystancji wpływać mogą także inne czynniki, takie jak upływność izolacji zacisków oraz izolacji przełącznika. Dla imitatora niedokładność rezystancji zastępczej można wyrazić wzorem (7)

$$\delta R_{N2}=\delta R_a+\delta R_b+\delta R_c+\delta_i+\delta_b \qquad (7)$$

gdzie: δR_{N2} – niedokładność rezystancji widzianej między zaciskami H_i i L_{o2},

δR_a, δR_b, δR_c – klasa dokładności rezystorów imitatora,

δ_i – błąd systematyczny wynikający z przyjęcia przybliżonego wzoru (6),

δ_b – błąd wywołany zewnętrzną rezystancją, obciążającą wyjściowy zacisk L_{o2}.

Wpływ zewnętrznej rezystancji obciążającej L_{o2} (błąd δ_b) zależy od sposobu włączenia imitatora do obwodu. W większości praktycznych zastosowań, np. przy kontroli gigaomomierza [6], zacisk L_{o2} połączony jest z masą za pośrednictwem niskoomowej rezystancji wejścia prądowego tego przyrządu (o wartości nie przekraczającej $10^5\Omega$). Wystarczy, aby ta rezystancja była mniejsza o 4 rzędy od rezystancji R_b imitatora (tj. mniejsza od $10^6\Omega$) aby jej wpływ można było pominąć. Drugi, znacznie mniej znaczący składnik tego błędu jest efektem rozpływu prądu z zacisku L_{o2} między rezystancję wejściową kontrolowanego przyrządu i rezystancję izolacji. Wartość rezystancji izolacji powyżej $10^{10}\Omega$ dopuszcza pominięcie jej wpływu. Podobnie rezystancja izolacji zacisku środkowego „TEST" imitatora oraz przełącznika P_2 ma bardzo mały wpływ na niedokładność rezystancji, gdyż bocznikuje do masy niskoomowy rezystor nastawny R_c, którego największa wartość nie przekracza $10^7\Omega$. Aby bocznikujący wpływ tych izolacji był pomijalnie mały, rezystancja upływu do masy powinna być większa od $10^{11}\Omega$. Jako zacisków L_{o2} i „TEST" użyto gniazd koncentrycznych z izolacją teflonową (R izolacji > $10^{14}\Omega$), a jako P_1 i P_2 – przełączników z izolacją polietylenową (R upływu > $10^{12}\Omega$).

Błąd systematyczny poprawności imitacji δ_i należy uwzględniać jedynie w postaci poprawki dla niższych wartości imitowanych 10^{11} i $10^{12}\Omega$. W wykonanym imitatorze poprawka została uwzględniona przy doborze przełączanych rezystorów R_c. Z kolei, rezystancję $10^{10}\Omega$ uzyskuje się bez imitacji jako sumę rezystora bazowego R_b i stałego rezystora Ra. Wartość Ra jest pomijalna w stosunku do rezystora $R_b=10^{10}\Omega$, przy czym popełniany jest błąd systematyczny mniejszy od 0,1%. Poprawka na ten błąd może być uwzględniona w procesie kalibracji poprzez dobór wartości R_b, co ma miejsce w wykonanym wzorcu.

Podsumowanie

Prezentowany model wzorca zawiera w jednej obudowie dwa różne oparte na innej zasadzie działania, typy wzorców: dwuzaciskowy i trójzaciskowy imitowany. Takie połączenie sprawia, że można przy jego pomocy uzyskać szeroki zakres nastawianych rezystancji wzorcowych potrzebnych przy sprawdzaniu mierników wielkich rezystancji. Na podkreślenie zasługuje rozszerzenie górnego zakresu wartości aż do $10^{14}\Omega$, przy wykorzystaniu znanej transformacji układu gwiazdy w trójkąt. Jakkolwiek wzorzec imitowany wykazuje pewne ograniczenia w praktycznym stosowaniu, niemniej jednak w większości przypadków jest w pełni użytecznym narzędziem kontrolnym do sprawdzania aparatury elektrometrycznej. Jest on prosty do wykonania z dostępnych obecnie na rynku precyzyjnych rezystorów wysokoomowych typu MOX o wartościach nominalnie znacznie niższych od imitowanej za ich pomocą wartości wzorcowej rezystancji. Jest on również tani i prosty w obsłudze i może być przydatny w laboratoriach eksploatujących aparaturę elektrometryczną. Zasady stosowania imitowanych wzorców wysokoomowych będą przedstawione w innej publikacji. Parametry metrologiczne wykonanego modelu wzorca są bardzo dobre i predestynują go do roli przenośnego wzorca kontrolnego wielkich rezystancji. Wzorzec taki praktycznie pokrywa potrzeby metrologiczne występujące przy tego typu pomiarach.

Parametry metrologiczne

1. Wartości nominalne: 10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8, 10^9, 10^{10}, 10^{11}, 10^{12}, 10^{13} i $10^{14}\Omega$
2. Niedokładność:
   10^4–$10^6\Omega$ ≤0,1%
   10^7–$10^8\Omega$ ≤0,5%
   10^9–$10^{10}\Omega$ ≤1%
   10^{11}–$10^{14}\Omega$ ≤1,5%
3. Napięcie dopuszczalne:
   $10^4\Omega$ – 100V
   $10^5\Omega$ – 300V
   pozostałe – 1000V
4. Zakres temperatur: +(10÷30)°C,
5. Współczynnik temperaturowy rezystancji:
   10^4–$10^6\Omega$ ≤±20ppm/K
   pozostałe ≤±250ppm/K
6. Współczynnik napięciowy rezystancji:
   10^4–$10^6\Omega$ nie występuje
   10^7–$10^9\Omega$ ≤–2ppm/V
   10^{10}–$10^{14}\Omega$ ≤–4ppm/V

Literatura

[1] Z. KŁOS: Wysokoomowe dekadowe wzorce do testowania mierników wielkich rezystancji metodą bezpośrednią. Biuletyn Głównego Urzędu Miar - Metrologia i Probiernictwo, 1997, nr2.

[2] Z. KŁOS: Zestaw kontrolny wzorców wysokoomowych typ ZKRW-1. Pomiary Automatyka Kontrola, 2000, nr10.

[3] T.B. ROŻDIESTWIENSKAJA, W.L. ŻUTOWSKIJ: Miery bolszowo soprotiwlienija. Izmieritelnaja Tiechnika, 1968, nr3.

[4] Z. KŁOS, P. MADEJ: Wzorcowanie megaomomierzy elektronicznych metodą kalibracji bloków funkcjonalnych. Normalizacja, 1993, nr4.

[5] Z. KŁOS, P. MADEJ: Wzorcowanie megaomomierzy elektronicznych metodą stopniowania. Normalizacja, 1993, nr11-12.

[6] Z. KŁOS, P. MADEJ: Analogowe metody pomiaru wielkich rezystancji. Normalizacja, 1993, nr3.

[7] Z. KŁOS: Własności wysokoomowych rezystorów tlenkowych typu MOX. Normalizacja, 1992, nr12.

[8] Z. KŁOS: Własności wysokoomowych rezystorów kompozytowych. Normalizacja, 1992, nr9.

[9] Z. KŁOS, P. MADEJ: Elektroniczny megaomomierz analogowy typ EMA-1. Pomiary Automatyka Kontrola, 1994, nr1.