

## Michał LISOWSKI

INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI

ODDZIAŁ TECHNOLOGII I MATERIAŁOZNAWSTWA ELEKTROTECHNICZNEGO WE WROCŁAWIU

# Metody wzorcowania analogowych mierników bardzo dużych rezystancji

## Część I: Metoda bezpośrednia

### Dr hab. inż. Michał LISOWSKI

Profesor nadzwyczajny Politechniki Wrocławskiej i profesor kontraktowy Instytutu Elektrotechniki. Ukończył w 1969 r. Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej. Stopień doktora nt. uzyskał w 1975 r., a doktora habilitowanego w 1990 r. Jest nauczycielem akademickim w Politechnice Wrocławskiej, w latach 1968–1994 w Instytucie Metrologii Elektrycznej, a od 1995 w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii. Od 1995 r. dodatkowo pracuje w Oddziale Wrocławskim Instytutu Elektrotechniki, gdzie od 1996 r. jest kierownikiem Pracowni Pomiarów i Diagnostyki. W swoich badaniach naukowych zajmuje się pomiarami precyzyjnymi, aparaturą pomiarową do badania nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego i badaniami materiałów elektrotechnicznych.



### Streszczenie

W artykule opisano metody wzorcowania mierników bardzo dużych rezystancji, działających na zasadzie pomiaru prądu przepływającego przez mierzony rezystor przy znanym napięciu źródła. W części I przedstawiono wymagania przepisów i norm oraz metodę bezpośrednią i jej ograniczenia. Natomiast w części II opisano opracowane przez autora nową metodę interpolacyjną i metody pośrednie, które umożliwiają wzorcowanie tych mierników w zakresach pomiarowych wyższych od wartości posiadanych rezystorów wzorcowych.

### Abstract

Methods of calibration of high resistance meters, working on a measurement of the current flowing by the measured resistor with the known voltage source have been described in the paper. In the I part there are presented regulations demands and norms and also direct method and its limitations. In the II part there are described worked out by the author new interpolation method and indirect methods, which enable calibration of such meters in the measuring ranges higher than the value of possessed calibration resistors.

## 1. Wstęp

Analogowe mierniki rezystancji, podobnie jak inne mierniki analogowe, powinny być sprawdzane, czyli wzorcowane, zgodnie z normą PN-EN 60051-09:2000 [1]. Powinny one odpowiadać wymaganiom norm PN-EN 60051-01:2000 [2] i PN-EN 60051-06:2000 [3]. Mierniki dużych rezystancji, nazywane miernikami rezystancji izolacji, powinny być wzorcowane zgodnie z *Instrukcją sprawdzania mierników oporu izolacji*, stanowiącą załącznik do zarządzenia nr 19 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dn. 11 lipca 2000 r. [4]. Zakres wzorcowania podany w tej instrukcji jest zbyt ubogi, a informacje o sposobie wzorcowania mogą być niewystarczające dla personelu wykonującego wzorcowanie mierników bardzo dużych rezystancji. Pomiary bardzo dużych rezystancji są jednymi z trudniejszych i wymagają dużego doświadczenia od personelu, a wzorcowanie mierników bardzo dużych rezystancji jest jeszcze trudniejsze. Zawarte tu informacje wykraczają poza treść *Instrukcji GUM* [4], ale nie są z nią sprzeczne.

Wzorcowanie powinno się odbywać w warunkach odniesienia podanych w *Instrukcji GUM*, tj. w temperaturze otoczenia  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej 40–75%. Przed wzorcowaniem przyrządu pomiarowego powinny przebywać odpowiednio długo (zazwyczaj 2 godziny) w temperaturze otoczenia  $23^{\circ}\text{C}$  w celu wyeliminowania wpływu niejednorodności rozkładu temperatury. Przed wzorcowaniem należy dokonać:

- oględzin zewnętrznych,
- sprawdzenia wstępnego.

Podczas oględzin wstępnych należy sprawdzić czy miernik nie wykazuje wad i uszkodzeń mechanicznych, a konstrukcja, wykonanie i instrukcja obsługi odpowiadają wymaganiom przepisów o miernikach. Szczególnie należy zwrócić uwagę na stan zewnętrzny przyrządu (szybki, skali i wskazówki). W toku oględzin należy sprawdzić działanie urzędzenia do nastawiania wskazówki na „zero mechaniczne”. Dla mierników rezystancji odpowiada ono najczęściej wskazowi oznaczonemu symbolem nieskończoności ( $\infty$ ).

Celem sprawdzenia wstępnego jest ustalenie czy przyrząd nie wykazuje zasadniczych usterek pod względem mechanicznym i elektrycznym. Powinno ono obejmować:

- sprawdzenie elementów do przełączania, polegające na stwierdzeniu możliwości wybrania w sposób niezawodny funkcji i zakresu pomiarowego,
- sprawdzenie ustawienia wskazówki na „zero mechaniczne” (bez włączenia zasilania przyrządu położenie wskazówki powinno pokrywać się ze wskazem oznaczonym „ $\infty$ ”),
- sprawdzenie ustawienia wskazówki na „zero elektryczne” (po włączeniu zasilania przyrządu i rozwarciu zacisków wejściowych przyrząd powinien wskazywać „ $\infty$ ”),
- sprawdzenie ustawienia wskazówki na wskaz kalibracyjny, jeżeli istnieje (często mierniki rezystancji wymagają przed pomiarem kalibracji, czyli ustawienia położenia wskazówki, przy odpowiednim położeniu przełącznika przyrządu, na punkt kalibracyjny),
- sprawdzenie wartości napięcia źródła,
- sprawdzenie wpływu odchylenia miernika od normalnej pozycji pracy dla wybranych, ustalonych wartości wielkości mierzonej.

Jeżeli nie ma „zera mechanicznego” lub „zera elektrycznego” lub też wskazania kalibracyjnego, należy dokonać odpowiednich ustawień. Napięcie źródła powinno mieć wartość podaną w instrukcji obsługi przyrządu. Do jego kontroli należy użyć woltomierza o odpowiedniej dokładności i dostatecznie dużej rezystancji wejściowej. *Instrukcja GUM* [4] podaje, że pomiary należy wykonać woltomierzem z sondą wysokonapięciową o oporze elektrycznym wewnętrznym  $\geq 100\text{ M}\Omega$  przy najmniejszej wartości mierzonej oporu elektrycznego. Jeżeli jednak miernik napięcia, np. elektrostatyczny, ma wystarczający zakres pomiarowy, nie ma potrzeby używania sondy wysokonapięciowej.

Wzorcowanie wykonuje się na wszystkich zakresach pomiarowych w ustalonych punktach kontrolnych, czyli dla wszystkich ocyfrowanych wskazówek podziałki leżących w zakresie pomiarowym. Jeżeli na skali przyrządu jest mniej niż 5 ocyfrowanych wskazówek, to wzorcowanie należy wykonać w dodatkowych punktach skali, tak aby ich liczba była nie mniejsza niż 5, łącznie z górną i dolną granicą zakresu pomiarowego.

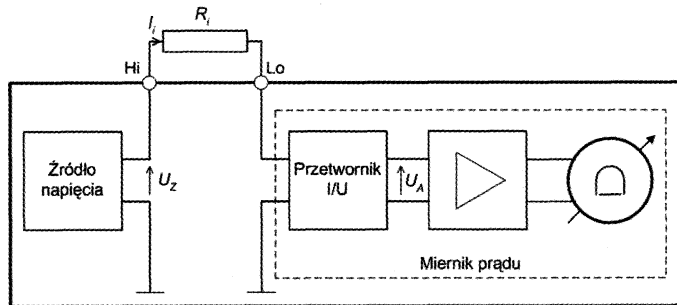
Zgodnie z normą PN-EN ISO/IEC 17025:2002 [5] wyniki wzorcowania, czyli wartości wyznaczonych błędów wskazań, powinny być podane wraz z ich niepewnością. Przy szacowaniu niepewności pomiarów podczas wzorcowania można posłużyć się wytycznymi podanymi w publikacji EA-4/2 opracowanej przez *European co-operation for Accreditation* [6].

*Instrukcja GUM* [4] podaje, że błędy podstawowe mierników rezystancji izolacji należy sprawdzić przez porównanie wskazań mierników ze wskazaniami kalibratorów wielkich rezystancji lub rezystorów dekadowych. Dopuszcza ona użycie pojedynczych rezystorów wzorcowych. Dla mierników bardzo dużych rezystancji takie bezpośrednie porówna-

nie na najwyższych zakresach pomiarowych jest niemożliwe do zrealizowania, ponieważ brak jest odpowiednich rezystorów wzorcowych.

## 2. Zasada funkcjonowania mierników analogowych bardzo dużych rezystancji

Podane w tej publikacji metody wzorcowania odnoszą się tylko do najczęściej stosowanych mierników analogowych bardzo dużych rezystancji, których funkcjonowanie opiera się na pomiarze prądu przepływającego przez mierzoną rezystancję [7,8] (rys.1).



Rys. 1. Uproszczony schemat analogowego miernika dużych rezystancji

Prąd  $I_i$ , przepływający przez mierzoną rezystancję  $R_i$ , przetwarzany jest w przetworniku I/U na napięcie, które następnie mierzone jest analogowym miernikiem magnetoelektrycznym [8]. Źródłem tego prądu jest stabilizowane źródło napięcia, przeważnie znajdujące się wewnątrz przyrządu. Mierzoną rezystancję określa się ze wzoru

$$R_i = \frac{U_z}{I_i} \quad (1)$$

w którym:  $U_z$  – napięcie stabilizowanego źródła,

$I_i$  – prąd przepływający przez mierzoną rezystancję  $R$ .

Skala miernika rezystancji jest nieliniowa, hiperboliczna. Zerowej wartości prądu odpowiada rezystancja „ $\infty$ ”. Minimalnej wartości mierzonej rezystancji na danym zakresie pomiarowym odpowiada maksymalny prąd na tym zakresie. Zakres prądowy zmieniany jest poprzez zmianę rezystancji w sprzężeniu zwrotnym wzmacniacza, pełniącego rolę przetwornika I/U. Przy ustalonej wartości napięcia źródła, jest to równoznaczne ze zmianą zakresu miernika dużych rezystancji. Ale zakres pomiarowy miernika rezystancji zależy również od wartości napięcia źródła. Zwykle jego wartości są tak dobrane, że zmiana napięcia powoduje zmianę dziesiętną zakresu rezystancji. Wartość mierzonej rezystancji określa się ze wzoru

$$R_i = \alpha_i k_u 10^n \quad (2)$$

w którym:  $\alpha_i$  – wskazanie miernika na nieliniowej podziałce w działkach,

$k_u$  – stała zależna od wartości napięcia źródła (mnożnik podziałki),

$10^n$  – stała zależna od zakresu pomiarowego (mnożnik zakresu),

$n$  – wykładnik potęgi mnożnika zakresu.

Według normy PN-EN-60051-6:2000 [3] i *Przepisów metrologicznych o miernikach oporu izolacji*, które są załącznikiem do zarządzenia nr 18 Prezesa GUM z dn. 11 lipca 2000 r. [9], niedokładność mierników analogowych do pomiaru rezystancji określona jest wskaźnikiem klasy dokładności, która wyznacza graniczne wartości błędów dopuszczalnych wyrażonych w % względem wartości umownej wielkości mierzonej. Wartością umowną może być górna granica zakresu pomiarowego, wartość wskazana wielkości mierzonej lub długość podziałki. Czyli niedokładność miernika rezystancji powinna być podana jednoznacznie. Jednak wielu producentów, ze względu na nieliniowy charakter podziałki, dopuszczalny błąd wskazań mierników bardzo dużych rezystancji podaje dwuskładnikowo, analogicznie jak dla przyrządów

cyfrowych, np.  $\pm(1,5+1,5\alpha/\alpha_k)\%$ , gdzie  $\alpha_k$  jest kalibracyjną wartością wskazania; najczęściej  $\alpha_k=1$  lub 0,5.

Większość mierników bardzo dużych rezystancji może być również wykorzystywana jako mierniki prądu. Wówczas, dla odczytu wartości prądu, wyposażone są one w dodatkową liniową podziałkę.

Obwód wejściowy przetwornika I/U często zabezpieczony jest wewnętrznym rezystorem (jego wartość powinna być podana w instrukcji obsługi), który na najniższych zakresach pomiarowych rezystancji może być źródłem dodatkowych błędów. Dlatego dla tych zakresów należy wprowadzić poprawkę, czyli od zmierzonej wartości odjąć wartość rezystancji tego rezystora.

## 3. Metoda bezpośrednia wzorcowania mierników rezystancji

Metoda bezpośrednia wzorcowania mierników rezystancji polega na włączeniu w miejsce rezystora mierzonego  $R_i$  nastawnego rezystora wzorcowego  $R_w$  (dekadowego). Metoda ta jest zalecana przez normę PN-EN 60051-09:2000. Zaleca się, aby niepewność wartości rezystora nie przekraczała jednej dziesiątej dopuszczalnego błędu sprawdzonego omomierza. Dopuszcza się użycie rezystora wzorcowego o niepewności wartości nastaw równej 1/4 błędu dopuszczalnego. Należy zwrócić uwagę na wpływ rezystancji izolacji przewodów, aby nie miała ona istotnego znaczenia dla wyników pomiarów. Najlepiej do tego celu stosować przewody ekranowane zalecane przez producenta.

Po włączeniu dekadowego rezystora wzorcowego należy zwiększać powoli jego nastawy tak, aby bez opukiwania przyrządu pomiarowego nastawić wskazówkę kolejno na każdy ze sprawdzanych wskazów i zapisać wyniki pomiarów. Następnie należy zwiększyć wartość nastawionej rezystancji do 120% wartości odpowiadającej granicy górnej zakresu pomiarowego lub powodującej dojście wskazówki do ogranicznika, gdy ta wartość jest mniejsza, i powoli zmniejszać wielkość mierzoną tak, aby bez opukiwania przyrządu nastawić wskazówkę kolejno na te same sprawdzane punkty podziałki i zanotować wyniki pomiarów.

Na niepewność wyznaczenia błędów wzorcowanego miernika decydujący wpływ ma, poza dokładnością wzorcowego rezystora dekadowego, niepewność odczytu ze skali przyrządu analogowego.

Wzorcowanie mierników rezystancji metodą bezpośredniego porównania jest możliwe w zakresie nastaw kontrolnego rezystora wzorcowego. Wielodekadowe rezystory drutowe, charakteryzujące się znacznie większą dokładnością od innych rezystorów (kompozytowych i tlenkowych) mają przeważnie najwyższe dekady o wartości  $10 \times 10$  M $\Omega$ , a niekiedy  $10 \times 100$  M $\Omega$ . Powyżej 100 M $\Omega$  rezystory wykonywane są z materiałów kompozytowych lub tlenkowych typu MOX. Rezystory kompozytowe charakteryzują się dużą niedokładnością 5+20% [10]. Rezystory tlenkowe typu MOX, produkowane przez firmy amerykańskie Victoreen i Vishay-Dale osiągają niedokładność 1% [11] i są chętnie wykorzystywane do budowy aparatury pomiarowej. Z rezystorów tych zbudowano w Politechnice Wrocławskiej eksperymentalne rezystory z najwyższą dekadą  $10 \times 10$  G $\Omega$  [12] o niedokładności 1%. Również firma ZELAP we Wrocławiu oferuje wysokoomowe rezystory dekadowe o najwyższej dekadzie  $10 \times 100$  G $\Omega$  klasy 2,5 [13]. Dekady  $10 \times (100 \text{ M}\Omega \pm 10 \text{ G}\Omega)$  mają klasę 1,5, a  $10 \times 10$  M $\Omega$  i  $10 \times 1$  M $\Omega$  – klasę 1. Zbudowane są one w oparciu o rezystory Thick Film F44D firmy Welbyun, Metal Oxide ROX-1 firmy Vishay-Dale i GS-1 firmy Tama [13].

Unikalne precyzyjne rezystory wysokoomowe o najwyższej dekadzie  $10 \times 100$  G $\Omega$  i niedokładności 1% (a w specjalnym wykonaniu 0,5%) oferuje firma Iet Labs Inc. w USA [14]. Ze względu na bardzo wysoką cenę tych rezystorów dekadowych rzadko które laboratorium jest w nie wyposażone.

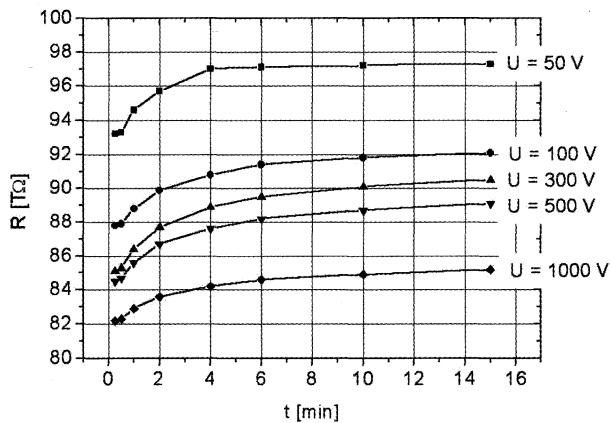
Laboratoria wzorcujące mierniki dużych rezystancji dysponują rezystorami dekadowymi o odpowiedniej dokładności przeważnie do 1 G $\Omega$ . Metodą bezpośrednią, przez podstawienie rezystora wzorcowego w miejsca rezystora mierzonego, mogą praktycznie sprawdzać mierniki rezystancji w granicach do 1 G $\Omega$ . W zakresie od 1 G $\Omega$  do 100 T $\Omega$

produkowane są wzorcowe rezystory kontrolne o pojedynczych wartościach nominalnych: 1 GΩ, 10 GΩ, 100 GΩ, 1 TΩ, 10 TΩ, 100 TΩ 1 PΩ. Takie rezystory o najwyższych dokładnościach, produkowane są przez firmę Guildline Instruments Inc. w Kanadzie [15]. Pracownia Pomiarów i Diagnostyki Oddziału Wrocławskiego Instytutu Elektrotechniki posiada wysokoomowe rezystory wzorcowe serii 9336 i 9337 tej firmy o wartościach nominalnych 10 GΩ, 100 GΩ, 1 TΩ, 10 TΩ, 100 TΩ. Parametry tych rezystorów zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Parametry wysokoomowych rezystorów wzorcowych firmy Guildline Instruments

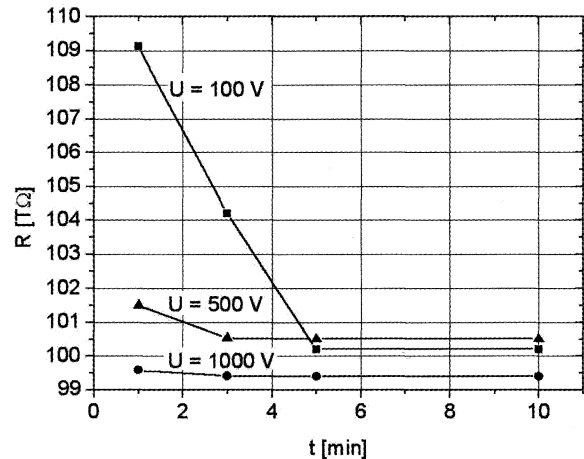
Model	Wartość nominalna Ω	Tolerancja ppm	Niepewność wzorcowania ppm	Stabilność roczna ppm	Współczynnik temperaturowy ppm/°C	Współczynnik napięciowy ppm/V
9336/10G	10 GΩ	±200	±150	±100	±25	±1
9336/100G	100 GΩ	±500	±750	±200	±250	±1
9337/1T	1 TΩ	±2000	±1000	±500	±300	±2
9337/10T	10 TΩ	±6000	±4500	±750	±500	±2
9337/100T	100 TΩ	±1%	±5500	±1000	±800	±2

Znamienną cechą rezystorów wysokoomowych są długie stałe czasowe ustalania się wartości, które są tym większe im większe są wartości rezystancji. Wynika to z powolnego zanikania prądów absorpcji ma-



**Rys. 2.** Zmiana rezystancji rezystora wzorcowego 100 TΩ firmy Statron w funkcji czasu i napięcia

teriałów z których są one wykonane. Przykładowo na rys. 2 pokazano charakterystyki czasowe zmian rezystancji popularnego rezystora 100 TΩ firmy Statron przy różnych napięciach. Wyraźnie widać tu wpływ czasu i napięcia na wartość rezystancji. Dla uniknięcia błędów wzorcowania tym spowodowanych należy odczekać pewien czas aż ustalą się wskazania. Należy również uwzględnić poprawną wartość rezystancji dla danego napięcia pomiarowego.



**Rys. 3.** Zmiana rezystancji rezystora wzorcowego 100 TΩ firmy Guildline Instruments w funkcji czasu i napięcia

Dla najlepszych rezystorów wzorcowych firmy Guildline Instruments czasy ustalania się rezystancji są krótsze niż dla przeciętnych rezystorów wysokoomowych. Obrazuje to rys. 3, na którym pokazano zależność rezystancji w funkcji czasu dla rezystora 100 TΩ typu 9337 przy różnych napięciach. Czas ustalania się wartości jest jednak rzędu 5 minut. Wcześniejsze odczyty wyników wzorcowania mogą być obciążone dodatkowymi błędami wynikającymi z nie ustalenia się wartości rezystancji.

Wykaz literatury – w części II publikacji.

Praca powstała w ramach projektu badawczego nr 8 T10A 0 54 21 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

## Metody wzorcowania analogowych mierników bardzo dużych rezystancji Część II: Metoda interpolacyjna i metody pośrednie

### 4. Metoda interpolacyjna

Wzorcowe rezystory wysokoomowe umożliwiają sprawdzanie mierników bardzo dużych rezystancji tylko w pojedynczych punktach skali przyrządu. Jak więc spełnić wymaganie wyznaczenia błędów wskazań sprawdzanego miernika analogowego dla wszystkich pozostałych odczytów? Odpowiedź na to pytanie zawarta jest w opracowanej przez autora metodzie interpolacyjnej.

Jeżeli miernik rezystancji potraktuje się jako miernik prądu o liniowej podziałce, to dla sprawdzenia tego miernika o kilku zakresach pomiarowych wystarczy sprawdzić jego wskazania dla wszystkich odczytów na jednym zakresie „a”, a dla pozostałych można zastosować metodę interpolacyjną, wyznaczając metodą pomiarową błąd tylko w jednym punkcie skali, najlepiej na jej końcu. Dla wyznaczania wartości błędów w pozostałych punktach podziałki liniowej „b” korzysta się ze wzoru interpolacyjnego

$$\Delta l_{bi} = \Delta l_{ai} + (\Delta l_{bm} - \Delta l_{am}) \frac{l_i}{l_m} \quad (3)$$

w którym:  $l_i$  – wskazania miernika prądu w punkcie „i” podziałki (długość podziałki od początku skali do położenia wskazówki [mm]),  
 $l_m$  – wskazania miernika prądu w punkcie „m” podziałki,

$\Delta l_{ai}$  – błąd bezwzględny odczytany z tabeli sprawdzanego zakresu „a” w „i-tym” punkcie podziałki,

$\Delta l_{am}$  – błąd bezwzględny odczytany z tabeli sprawdzanego zakresu „a” w punkcie „m” (najczęściej koniec zakresu),

$\Delta l_{bm}$  – błąd bezwzględny wyznaczony metodą pomiarową na podziałce „b” w punkcie „m”,

$\Delta l_{bi}$  – błąd bezwzględny wyznaczony metodą interpolacyjną w „i-tym” punkcie podziałki na zakresie „b”.

Prąd wskazywany w „i-tym” punkcie podziałki

$$I_i = c l_i \quad (4)$$

gdzie  $c$  jest stałą prądową [A/mm].

Podstawiając wyrażenie (4) do wzoru (1) otrzymuje się

$$R_i = \frac{U_z}{c l_i} = \frac{k}{l_i} \quad (5)$$

gdzie  $k = U_z/c$  jest wielkością stałą dla danego zakresu pomiarowego miernika rezystancji. Wzór (5) jest słuszny również dla przyrządów, czyli błędów bezwzględnych, zatem

$$\Delta R_i = \frac{k}{\Delta l_i} \quad (6)$$

Stąd

$$\Delta l_i = \frac{k}{\Delta R_i} \quad (7)$$

gdzie:  $\Delta l_i$  – błąd miernika prądu w „i”-tym punkcie podziałki,  
 $\Delta R_i$  – błąd miernika rezystancji w „i”-tym punkcie podziałki.  
 Ponieważ  $\Delta R_i = R_i \cdot \delta R_i$  wzór (7) przyjmuje postać

$$\Delta l_i = \frac{k}{R_i \cdot \delta R_i} \quad (8)$$

w którym  $\delta R_i$  jest błędem względnym w  $i$ -tym punkcie podziałki miernika.

Podstawiając wzór (8) do wyrażenia (3) i uwzględniając zależność (5), z dostosowaniem odpowiednich indeksów, otrzymuje się

$$\frac{k_b}{R_{bi} \delta R_{bi}} = \frac{k_a}{R_{ai} \delta R_{ai}} + \left( \frac{k_b}{R_{bm} \delta R_{bm}} - \frac{k_a}{R_{am} \delta R_{am}} \right) \frac{R_{am}}{R_{ai}} \quad (9)$$

gdzie:  $k_a$  – stała dla zakresu „a”,  
 $k_b$  – stała dla zakresu „b”,  
 $R_{ai}$  – wartość rezystancji mierzonej przez miernik na zakresie „a” przy wskazaniu  $\alpha_i$ ,  
 $R_{bi}$  – wartość rezystancji mierzonej przez miernik na zakresie „b” przy wskazaniu  $\alpha_i$ ,  
 $R_{am}$  – wartość rezystancji mierzonej przez miernik na zakresie „a” przy wskazaniu  $\alpha_m$ ,  
 $R_{bm}$  – wartość rezystancji mierzonej przez miernik na zakresie „b” przy wskazaniu  $\alpha_m$ ,  
 $\delta R_{ai}$  – błąd względny wskazań miernika na zakresie „a” przy wskazaniu  $\alpha_i$ ,  
 $\delta R_{bi}$  – błąd względny wskazań miernika na zakresie „b” przy wskazaniu  $\alpha_i$ .

Ze wzoru (9) wynika, że

$$l_i = \frac{k_a}{R_{ai}} = \frac{k_b}{R_{bi}} \quad (10)$$

$$\frac{R_{am}}{R_{ai}} = \frac{R_{bm}}{R_{bi}} \quad (11)$$

Po uwzględnieniu wyrażen (10) i (11) wzór (9) przyjmuje postać

$$\frac{1}{\delta R_{bi}} = \frac{1}{\delta R_{ai}} + \frac{1}{\delta R_{bm}} - \frac{1}{\delta R_{am}} \quad (12)$$

Ponieważ  $\delta R_{bi} \ll 1$ ,  $\delta R_{ai} \ll 1$ ,  $\delta R_{bm} \ll 1$ ,  $\delta R_{am} \ll 1$ , to wzór (12) można zapisać w ostatecznej praktycznie przydatnej postaci

$$\delta R_{bi} = \delta R_{ai} + \delta R_{bm} - \delta R_{am} \quad (13)$$

Niepewność wyznaczenia błędów wskazań miernika  $u(\delta R_{ai})$ , metodą bezpośredniego porównania z wzorcem rezystancji dla zakresu „a”, jest wypadkową niepewnością z niepewności rezystancji wzorcowej  $u(R_{wi})$  i niepewności odczytu wskazania ze skali sprawdzanego miernika  $u(\alpha_i)$ . Jako niepewność odczytu rezystancji można przyjąć najmniejszą wartość odstrojenia dekadowego rezystora wzorcowego, dającą zauważalne odstrojenie wskazówki miernika lub określić ją z rozdzielczości wskazań miernika analogowego.

W przypadku określania błędów wskazań metodą interpolacyjną na zakresie „b”, niepewność tych błędów na poziomie ufności 0,95 wynosi

$$u(\delta R_{bi}) = \sqrt{u^2(\delta R_{ai}) + u^2(\delta R_{bm}) + u^2(\delta R_{am})} \quad (14)$$

gdzie:  $u(\delta R_{ai})$  – niepewność dla sprawdzonego zakresu „a” w punktach  $i$ ,

$u(\delta R_{am})$  – niepewność dla sprawdzonego zakresu „a” w punkcie  $m$ ,

$u(\delta R_{bm})$  – niepewność dla sprawdzonego zakresu „b” w punkcie  $m$ .

Powyższe rozważania ilustruje poniższy przykład. W tabeli 2 podano wyniki otrzymane metodą bezpośrednią dla zakresu „a”, a w tabeli 3 – metodą interpolacyjną dla zakresu „b”, przy czym wartości wytułszczone wyznaczone są metodą bezpośrednią. W tabelach tych  $R_{wi}$  jest wartością rezystancji wzorcowej, a  $u(R_{wi})$  niepewnością wartości tej rezystancji wzorcowej.

**Tabela 2.** Wyniki wzorcowania miernika dla zakresu „a” ( $R_{ai} = \alpha_i \times 10^7 \Omega$ )

$\alpha_i$	$R_{ai}$	$R_{wi}$	$u(R_{wi})$	$\delta R_{ai}$	$u(\delta R_{ai})$
dz	M $\Omega$	M $\Omega$	%	%	%
0,500	5,00	4,86	$\pm 0,05$	+2,8	$\pm 0,3$
0,700	7,00	6,99	$\pm 0,05$	+0,2	$\pm 0,4$
1,000	10,00	10,05	$\pm 0,1$	-0,5	$\pm 0,5$
2,00	20,0	20,4	$\pm 0,1$	-2,0	$\pm 0,8$
3,00	30,0	31,0	$\pm 0,1$	-3	$\pm 1$
5,0	50	52	$\pm 0,1$	-4	$\pm 2$

**Tabela 3.** Wyniki otrzymane metodą interpolacji dla zakresu „b” ( $R_{bi} = \alpha_i \times 10^{11} \Omega$ )

$\alpha_i$	$R_{bi}$	$R_{wi}$	$u(R_{wi})$	$\delta R_{bi}$	$u(\delta R_{bi})$
dz	G $\Omega$	G $\Omega$	%	%	%
0,500	50,0	-	-	+1,9	$\pm 0,8$
0,700	0,07	-	-	-0,9	$\pm 0,9$
<b>0,990</b>	<b>99,0</b>	<b>100,4</b>	<b><math>\pm 0,1</math></b>	<b>-1,4</b>	<b><math>\pm 0,5</math></b>
1,000	100,0	-	-	-1,4	$\pm 0,5$
2,00	200	-	-	-2,9	$\pm 1,1$
3,00	300	-	-	-4	$\pm 1,3$
5,0	50	-	-	-5	$\pm 2,2$

## 5. Metody pośrednie

Wzorcowanie mierników bardzo dużych rezystancji metodą bezpośrednią w zakresie powyżej  $10^{14} \Omega$ , przez podstawienie w miejsce mierzonej rezystancji rezystorów wzorcowych, jest niemożliwe do zrealizowania, ponieważ brak jest takich rezystorów wzorcowych. A górny zakres pomiarowy tych mierników może być  $10^{15} \div 10^{17} \Omega$ . Nawet poniżej  $10^{14} \Omega$  metodą bezpośrednią można sprawdzić miernik tylko w pojedynczych punktach, a dla pozostałych wskazań trzeba stosować opisaną metodę interpolacyjną. Rezystory  $10^{13} \Omega$ ,  $10^{14} \Omega$  są mało dokładne, a ponadto charakteryzują się długimi czasami ustalania się wartości, co wynika z ich charakterystyki czasowej prądu absorpcji, oraz dużą zależnością zmian rezystancji od przyłożonego napięcia (rys. 2 i 3).

W takiej sytuacji można zastosować metody pośrednie, np. metodę wzorcowania bloków funkcyjnych [16], czy też metodę stopniowania [17]. Metoda kalibracji bloków funkcyjnych, opisana w publikacji [16], polega na wyznaczaniu błędów przetwarzania poszczególnych bloków funkcyjnych miernika, a więc źródła napięcia pomiarowego, przetwornika I/U i analogowego bloku odczytu rezystancji. Błąd wskazania miernika jest wypadkową błędów napięcia pomiarowego źródła, przetwornika I/U i analogowego bloku odczytu rezystancji.

Wzorcowanie mierników bardzo dużych rezystancji metodą stopniowania odbywa się dwuetapowo. W pierwszym etapie wzorcuje się wszystkie możliwe do wywzorcowania dolne zakresy metodą bezpośrednią lub metodą wzorcowania poszczególnych bloków funkcyjnych. W drugim etapie wzorcuje się kolejno wyższe zakresy pomiarowe przy wykorzystaniu rezystorów tarowych. Mogą to być dowolne rezystory wysokoomowe, dla których nie stawia się specjalnych wymagań metrologicznych. Napięcia przykładane do takiego rezystora podczas pomiarów powinny mieć taką samą wartość. Wzorcowanie polega na pomiarach tego samego rezystora tarowego na dwóch sąsiednich zakresach miernika. Niższy, wzorcowany zakres jest w tym przypadku wzorc-

wym w stosunku do wyższego. Napięcie źródła  $U$  i rezystancja rezystora tarowego  $R_T$  powinny być tak dobrane, ażeby stosunek napięcia wyjściowego  $U_A$  z przetwornika I/U do napięcia źródła  $U_z$  wynosił w przybliżeniu 0,1 na niższym zakresie i 1 na wyższym zakresie, przy możliwie dużej wartości napięcia  $U_A$  i stałym napięciu źródła  $U_z$ . W metodzie tej wzrasta szybko niepewność wyznaczenia błędów wraz ze wzrostem sprawdzanych zakresów pomiarowych [17].

Metody te mogą być stosowane jedynie do wzorcowania przyrządów mających wyprowadzone na zewnątrz przyrządu wyjście z przetwornika I/U [16, 17].

Do wzorcowania górnych zakresów pomiarowych mierników bardzo dużych rezystancji można stosować opisaną poniżej metodę pośrednią, opracowaną przez autora, która jest modyfikacją metody opisanej w [16]. Do jej realizacji niezbędne jest regulowane źródło napięcia, dokładny woltomierz cyfrowy o dużej rezystancji wejściowej i wzorcowy rezystor wysokoomowy o znanej wartości  $R_w$ , włączony w miejsce mierzonej rezystancji. Dla nominalnego napięcia źródła  $U_{zn}$  wartość mierzonej rezystancji określona jest wzorem (2). Jeżeli napięcie źródła będzie miało wartość mniejszą, wynoszącą  $U_z$ , to przy tych samych stałych miernika  $k_u$  i  $10^n$  oraz tym samym wskazaniu  $\alpha_i$  mierzona wartość rezystancji będzie wynosiła

$$R_i = \frac{U_{zi}}{U_{zn}} \alpha_i k_u 10^n \quad (15)$$

Napięciem zewnętrznego źródła reguluje się tak, ażeby wskazówka miernika miała położenie sprawdzanego punktu skali  $\alpha_i$ . Zatem przy tej samej wartości rezystora wzorcowego można wyzorcować wszystkie odcyfrowane wskaźy miernika. Rezystor wzorcowy  $R_w$  powinien mieć tak dobraną wartość, ażeby napięcie  $U_{zi}$  było możliwie najwyższe. Napięcia  $U_{zi}$  i  $U_{zn}$  należy mierzyć precyzyjnym cyfrowym woltomierzem o bardzo dużej rezystancji, tzn. takiej ażeby wpływ obciążenia źródła przez woltomierz był pomijalnie mały. Warunek ten spełnia większość precyzyjnych woltomierzy cyfrowych.

Błąd wskazań miernika oblicza się ze wzoru

$$\Delta R_i = R_i - R_w \quad (16)$$

a niepewność określenia błędu  $\Delta R_i$  na poziomie ufności 0,95 można obliczyć z zależności

$$u(\Delta R_i) = \sqrt{u^2(R_w) + R_i^2 [u_w^2(U_{zi}) + u_w^2(U_{zn}) + u_w^2(\alpha_i)]} \quad (17)$$

w której:  $u_w(R_w)$  jest niepewnością względną określenia rezystancji rezystora wzorcowego,  $u_w(U_{zi})$ ,  $u_w(U_{zn})$ ,  $u_w(\alpha_i)$  są odpowiednio niepewnościami względnymi pomiaru napięcia źródła zewnętrznego i wewnętrznego oraz nastawy wskazówki na sprawdzany wskaz  $\alpha_i$ .

Metoda ta ma tę przewagę nad metodami opisanymi w pracach [16] i [17], że może być stosowana dla wszystkich mierników wysokich rezystancji, działających według zasady opisanej w punkcie 2 tej publikacji. Nie jest tu wymagane wyprowadzenie napięcia z przetwornika I/U na zewnątrz przyrządu.

## 6. Podsumowanie

Sprawdzanie poprawności wskazań mierników rezystancji wykonuje się najczęściej metodą bezpośredniego podstawienia nastawnego rezystora wzorcowego w miejsce rezystora mierzonego. Rezystory takie budowane są do wartości rzędu 1 GΩ. Powyżej, w zakresie do 100 TΩ, produkowane są tylko rezystory o stałych wartościach. Ze wzrostem wartości rezystora wzorcowego wzrasta niepewność określenia jego rezystancji.

Natomiast analogowe mierniki bardzo dużych rezystancji mają zakresy pomiarowe nawet do  $10^{15}$ – $10^{16}$ Ω. Wzorcowanie tych mierników w górnych zakresach pomiarowych możliwe jest metodą kalibracji bloków funkcyjnych lub metodą stopniowania. Metody te są jednak kłopotliwe w praktycznej realizacji i mogą być stosowane dla mierników z dodatkowym wyjściem analogowym z przetwornika I/U dla podłączenia woltomierza cyfrowego.

Zasadniczą część pracy jest opisem metody interpolacyjnej wyznaczenia błędów na zakresach, dla których istnieje możliwość pomiaru błędu przez porównanie z wzorcem w jednym punkcie oraz metody pośredniej wzorcowania dla najwyższych zakresów. Metoda ta jest modyfikacją metody wzorcowania poprzez wyznaczanie błędów poszczególnych bloków funkcyjnych [16]. Może ona jednak być stosowana dla wszystkich mierników wysokich rezystancji, gdyż nie wymaga dodatkowego wyjścia z przetwornika I/U. Metody te, opracowane przez autora, zostały wielokrotnie przetestowane podczas wzorcowania mierników bardzo dużych rezystancji w Pracowni Pomiarów i Diagnostyki Oddziału Wrocławskiego Instytutu Elektrotechniki.

## Literatura

- [1] PN-EN 60051-9:2000 *Elektryczne przyrządy pomiarowe wskazujące analogowe o działaniu bezpośrednim i ich przybory. Zalecane metody badań.*
- [2] PN-EN 60051-1:2000 *Elektryczne przyrządy pomiarowe wskazujące analogowe o działaniu bezpośrednim i ich przybory. Definicje i wymagania wspólne dla wszystkich arkuszy normy.*
- [3] PN-EN 60051-6:2000 *Elektryczne przyrządy pomiarowe wskazujące analogowe o działaniu bezpośrednim i ich przybory. Wymagania specjalne dotyczące omiomy (mierników impedancji) i mierników przewodności.*
- [4] Zarządzenie Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 11 lipca 2000 r. nr 19 w sprawie wprowadzenia instrukcji sprawdzania mierników oporu izolacji. Dz. Urz. Miar i Probiernictwa 2000, nr 4, s. 152.
- [5] PN-EN-ISO/IEC 17025: 2001 *Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.*
- [6] EA-4/02. *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.* European co-operation for Accreditation. December 1999.
- [7] Kłos Z., Madej P.: *Analogowe metody pomiaru wielkich rezystancji.* Normalizacja 1993, nr 3, s. 23.
- [8] Kłos Z., Madej P.: *Elektroniczny megaomomierz analogowy typ EMA-1.* PAK 1994, nr 1, s. 3.
- [9] Zarządzenie Prezesa Głównego Urzędu Miar nr 18 z dnia 11 lipca 2000 r. w sprawie wprowadzenia przepisów metrologicznych o miernikach oporu izolacji. Dz. Urz. Miar i Probiernictwa 2000, nr 4, s. 149.
- [10] Kłos Z.: *Własności wysokoomowych rezystorów kompozytowych.* Normalizacja 1992, nr 9, s. 17.
- [11] Kłos Z.: *Własności wysokoomowych rezystorów tlenkowych typu MOX.* Normalizacja 1992, nr 12, s. 13.
- [12] Kłos Z.: *Wysokoomowe dekadowe wzorce do testowania mierników wielkich rezystancji metodą bezpośrednią.* Metrologia i Probiernictwo 1997, nr 2, s. 12.
- [13] ZELAP Zakład Elektronicznej Aparatury Pomiarowej Jerzy Jaśkowski: *Oporniki dekadowe wysokoomowe typu OD-1-W i OD-2-W. Karta katalogowa.*
- [14] IET LABS Inc.: *High resistance decade substituter HRRS-B-3-1G series.*
- [15] GUILDLINE INSTRUMENTS Ltd.: *High value resistance standards 9336 series, and ultra high value resistance standards 9337 series.*
- [16] Kłos Z., Madej P.: *Wzorcowanie megaomomierzy analogowych metodą kalibracji bloków funkcjonalnych.* Normalizacja 1993, nr 4, s. 13.
- [17] Kłos Z., Madej P.: *Sprawdzanie wskazań megaomomierza elektronicznego metodą stopniowania.* Normalizacja 1993, nr 11–12, s. 22.

Praca powstała w ramach projektu badawczego nr 8 T10A 0 54 21 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.